

UCH-FC
Q. Ambiental
S259
C.1



FACULTAD DE CIENCIAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

**“ELABORACIÓN DE UN ÍNDICE DE CONDICIÓN DE FONDO (ICF) COMO
HERRAMIENTA DE CONTROL Y GESTIÓN AMBIENTAL EN ACTIVIDADES
ACUÍCOLAS”**

Seminario de Título entregado a la Universidad de Chile en cumplimiento parcial
de los requisitos para optar al Título de los requisitos para optar al Título de:



Químico Ambiental

María Natalia Salazar Dinator

Director de Seminario de Título y Profesor Patrocinante: Dra. Isel Cortés

Noviembre de 2010
Santiago - Chile



INFORME DE APROBACIÓN SEMINARIO DE TÍTULO

Se informa a la Escuela de Pregrado de la Facultad de Ciencias, de la Universidad de Chile que el Seminario de Título, presentado por el o (la) candidato (a):

MARÍA NATALIA SALAZAR DINATOR

“ELABORACIÓN DE UN ÍNDICE DE CONDICIÓN DE FONDO (ICF) COMO HERRAMIENTA DE CONTROL Y GESTIÓN AMBIENTAL EN ACTIVIDADES ACUÍCOLAS”


Ha sido aprobado por la Comisión de Evaluación, en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de Químico Ambiental

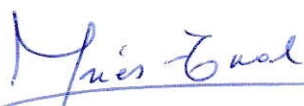
COMISIÓN DE EVALUACIÓN


Dra. Isel Cortés
**Director Seminario de Título y
Profesor Patrocinante**

Prof. María Inés Toral
Corrector

Dr. Mauricio Isaacs
Corrector









Santiago de Chile, noviembre de 2010

BIOGRAFÍA



María Natalia Salazar Dinator

Nací un 18 de septiembre de 1983 en la ciudad de Rengo, Región de O'Higgins. Mi formación escolar básica fue realizada en la Escuela República de Alemania y la formación media en el Liceo Luis Urbina Flores. En el año 2002 llegué a Santiago para ingresar a la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile a estudiar la carrera de Química Ambiental. Durante el periodo de formación profesional realicé pasantías en los laboratorios de Electroquímica de la Facultad de Ciencias y de Cromatografía en la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas. Durante el año 2008 obtuve el grado académico de Licenciada en Ciencias Ambientales c/mención en Química y durante el 2009 realicé mi memoria de título en el Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA) en el área Química bajo la tutela de la Dra. Isel Cortés Nodarse.



*A mis Padres,
Gracias por acompañarme en cada peldaño.*

Agradezco al Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA) por el apoyo prestado en el desarrollo de este Seminario de Título y especialmente a la Dra. Isel Cortés N. que me guió y apoyo durante todo este periodo.

También agradezco el apoyo incondicional de mi familia, de quienes siempre recibí su cariñosa ayuda y buena disposición.

De forma especial agradezco el amor incondicional de Sebastián, que supo contenerme y motivarme en todo este proceso de término de esta etapa universitaria.



ÍNDICE DE CONTENIDOS



Página

I. INTRODUCCIÓN

1.1.	Generalidades de la contaminación acuícola en el medio acuático....	4
1.2.	Regulaciones legales de la acuicultura en Chile.....	7
1.3.	Los sedimentos como receptores de contaminantes.....	11
1.4.	Índices como herramientas de control y gestión ambiental.....	14
1.5.	Hipótesis.....	20
1.6.	Objetivo General.....	20
1.7.	Objetivos Específicos.....	20

II. PARTE EXPERIMENTAL

2.1.	Protocolo general para el desarrollo de un índice ambiental.....	22
2.2.	Selección de Indicadores ambientales.....	23
2.3.	Selección de Valores Referenciales.....	25
2.4.	Bases de Datos.....	25
2.5.	Protocolos de Análisis.....	26

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1.	Antecedentes del Indicador Materia Orgánica	
3.1.1.	Antecedentes bibliográficos.....	27
3.1.2.	Valores de Referencia y de Ajuste.....	29
3.1.3.	Criterios de Corte.....	31
3.1.4.	Función de Calidad para Materia Orgánica.....	31



3.2.	Antecedentes del Indicador Potencial Redox	
3.2.1.	Antecedentes bibliográficos.....	33
3.2.2.	Valores de Referencia y de Ajuste.....	35
3.2.3.	Criterios de Corte.....	36
3.2.4.	Función de Calidad para Potencial Redox.....	36
3.3.	Antecedentes para el Indicador pH	
3.3.1.	Antecedentes bibliográficos.....	38
3.3.2.	Valores de Referencia y de Ajuste.....	39
3.3.3.	Criterios de Corte.....	40.
3.3.4.	Función de Calidad para pH.....	41
3.4.	Antecedentes para el Indicador Oxígeno Disuelto	
3.4.1.	Antecedentes bibliográficos.....	43
3.4.2.	Valores de Referencia y de Ajuste.....	44
3.4.3.	Criterios de Corte.....	46
3.4.4.	Función de Calidad para Oxígeno Disuelto.....	46
3.5.	Ponderación y combinación de Indicadores.....	48
3.5.1.	Principios generales para la distribución de ponderaciones.	49



3.6.	Validación del Índice de Calidad de sedimentos por categorías.....	51
3.6.1.	Categoría 1.....	52
3.6.1.1.	Año 2004.....	53
3.6.1.2.	Año 2005.....	55
3.6.1.3.	Año 2006.....	56
3.6.2.	Categoría 2.....	59
3.6.2.1.	Año 2004.....	60
3.6.2.2.	Año 2005.....	61
3.6.2.3.	Año 2006.....	63
3.6.3.	Categoría 3.....	65
3.6.3.1.	Año 2004.....	66
3.6.3.2.	Año 2005.....	68
3.6.3.3.	Año 2006.....	70
3.6.4.	Categoría 4.....	72
3.6.5.	Categoría 5.....	72
3.6.5.1.	Año 2004.....	73
3.6.5.2.	Año 2005.....	74
3.6.5.3.	Año 2006.....	76
3.7.	Aplicabilidad práctica del Índice de Condición de Fondo.....	78
3.8.	Discusión General.....	78
IV.	CONCLUSIONES.....	80
V.	PROYECCIONES.....	82
VI.	REFERENCIAS.....	84



VII. ANEXOS.....	90
Anexo 1: Glosario de términos según normativa vigente.....	91
Anexo 2: Metodologías de análisis.....	93

ÍNDICE DE TABLAS Y CUADROS



		Página
Tabla 1.	Clasificación de Centros de cultivos según Res. N° 404/03.....	10
Tabla 2.	Requisitos de parámetros para la CPS e INFA según categoría establecida en resolución N° 404/03	11
Tabla 3.	Distribución de indicadores según categorías de cultivo establecidas en resolución N° 404/03	24
Tabla 4.	Valores referenciales de contenido de Materia Orgánica en zonas libres de cultivos acuícolas.....	29
Tabla 5.	Valores referenciales de contenido de Materia Orgánica en zonas impactadas por cultivos.....	30
Tabla 6.	Criterios de corte para la Función de Calidad de Materia Orgánica.....	31
Tabla 7.	Valores referenciales de Potencial Redox (mV) en zonas impactadas por cultivos.....	35
Tabla 8.	Criterios de corte para la Función de Calidad de Potencial Redox.....	36
Tabla 9.	Valores referenciales de pH en zonas de estudio.....	40
Tabla 10.	Criterios de Corte para la Función de Calidad de pH.....	40
Tabla 11.	Valores referenciales de Oxígeno Disuelto (mL/L) en la zona de estudio.....	45
Tabla 12	Criterios de Corte para la Función de Calidad de Oxígeno Disuelto.....	46
Tabla 13	Universo de datos utilizados en la validación de resultados...	52

Tabla 14	Centros de cultivos pertenecientes a la Categoría 1 que disminuyen su calidad de fondo durante el periodo 2004-2006.....	58
Tabla 15	Centros de cultivos pertenecientes a la Categoría 2 que disminuyen su calidad de fondo durante el periodo 2004-2006.....	65
Tabla 16	Centros de cultivos pertenecientes a la Categoría 5 que disminuyen su calidad de fondo durante el periodo 2004-2006.....	77

ÍNDICE DE FIGURAS



	Página
Figura 1. Impactos ambientales producidos por la Acuicultura.....	5
Figura 2. Descripción gráfica de la relación entre la respuesta del indicador, el grado de la perturbación y el umbral para la acción de gestión o decisión.....	17
Figura 3. Pirámide de organización de la información.....	18
Figura 4. Curva de ajuste para la Función de Calidad del indicador Materia Orgánica.....	32
Figura 5. Perfil vertical de Potencial Redox en sedimentos.....	34
Figura 6. Curva de ajuste para la Función de Calidad del indicador Potencial Redox.....	37
Figura 7. Curva de ajuste para la Función de Calidad del indicador pH.....	42
Figura 8. Curva de ajuste para la Función de Calidad del indicador Oxígeno Disuelto.....	47
Figura 9. Escala de importancia para los indicadores ambientales seleccionados.....	50
Figura 10. Evaluación realizada por Sernapesca de la calidad de sedimentos para sitios de cultivo pertenecientes a la Categoría 1 durante el año 2004.....	53
Figura 11. Evaluación a través del ICF para sitios de cultivos pertenecientes a la Categoría 1 durante el año 2005.....	54



Figura 12.	Evaluación comparativa de la calidad del sedimento en sitios de cultivos Categoría 1 pertenecientes al año 2005.....	55
Figura 13.	Evaluación de la calidad del sedimento en sitios de cultivos Categoría 1 pertenecientes al año 2005 usando el ICF.....	56
Figura 14.	Evaluación del ICF para sitios de cultivos Categoría 1 evaluados durante el año 2006.....	57
Figura 15.	Evaluación de Sernapesca para sitios de cultivos pertenecientes a la Categoría 2 durante el año 2004.....	60
Figura 16.	Evaluación comparativa de la calidad de sedimentos usando el ICF para sitios de cultivos Categoría 2 pertenecientes al año 2004.....	61
Figura 17.	Evaluación de Sernapesca para sitios de cultivos Categoría 2 pertenecientes al año 2005.....	62
Figura 18.	Evaluación comparativa de la calidad de los sitios de cultivos a través de la evaluación del ICF para Categoría 2 pertenecientes al año 2005.....	63
Figura 19.	Evaluación comparativa de la calidad de sedimentos para sitios de cultivos Categoría 2 pertenecientes al año 2006.....	64
Figura 20.	Evaluación comparativa de la calidad de sedimentos para sitios de cultivos Categoría 3 pertenecientes al año 2004.....	67
Figura 21.	Evaluación comparativa a través del ICF de la calidad de sedimentos para sitios de cultivos Categoría 3 pertenecientes al año 2004.....	68
Figura 22.	Evaluación de Sernapesca de la calidad de sedimentos para sitios de cultivos Categoría 3 pertenecientes al año 2005	69



Figura 23.	Evaluación a través del ICF de la calidad de sedimentos para sitios de cultivos Categoría 3 pertenecientes al año 2005	69
Figura 24.	Evaluación del ICF para calidad de sedimentos en sitios de cultivos Categoría 3 pertenecientes al año 2006.....	70
Figura 25.	Evaluación entregada por Sernapesca para sitios de cultivos Categoría 5 pertenecientes al año 2004.....	73
Figura 26.	Evaluación entregada a través del ICF para sitios de cultivo Categoría 5 pertenecientes al año 2004.....	74
Figura 27.	Evaluación entregada por Sernapesca para sitios de cultivos Categoría 5 pertenecientes al año 2005.....	75
Figura 28.	Evaluación entregada a través del ICF para sitios de cultivos Categoría 5 pertenecientes al año 2005.....	75
Figura 29.	Evaluación entregada a través del ICF para sitios de cultivos Categoría 5 pertenecientes al año 2006.....	76

LISTA DE ABREVIATURAS



A.A.A.	Área apropiada para el ejercicio de Acuicultura.
CPS	Caracterización Preliminar de Sitio.
Eh	Potencial Redox.
ICAP	Índice de Calidad de Aire.
ICAS	Índice de Calidad de Aguas Superficiales.
ICF	Índice de Condición de Fondo.
INFA	Informe Ambiental.
LGPA	Ley General de Pesca y Acuicultura.
MOT	Materia Orgánica Total.
OCDE	Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico.
OD	Oxígeno Disuelto en la columna de agua.
RAMA	Reglamento Ambiental para la Acuicultura.
SEIA	Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental.
SUBPESCA	Subsecretaría de Pesca.

RESUMEN

Parte del éxito de los cultivos acuícolas en Chile se debe a la calidad de las aguas y a las condiciones ambientales que se dan en el sur de nuestro país. En este contexto, preservar el capital natural es esencial para que esta industria pueda mantener sus niveles de crecimiento.

La utilización de grandes cantidades de alimentos, antibióticos, fungicidas y pinturas anti-incrustantes o *antifouling* contribuye al deterioro de la calidad de los sitios de cultivo. Sin embargo, la gran variedad de parámetros involucrados (químicos, físicos y biológicos) hace compleja la comprensión acabada del sistema y, en muchas oportunidades, dificulta la toma de decisiones en forma temprana.

Desde el punto de vista químico, los sedimentos constituyen una matriz con grandes ventajas para evaluar, estimar y/o predecir problemas de contaminación ambiental en ecosistemas acuáticos ya que ellos constituyen un reservorio de sustancias que ingresan o que se generan en la columna de agua.

Debido a lo anterior, el Reglamento Ambiental para la Acuicultura fija como punto de referencia habilitante para el desarrollo de actividades de acuicultura, que los sedimentos de la concesión de cultivo presenten condiciones aeróbicas; es decir, que se encuentren oxigenados. Para controlar esta condición, todos los sitios de cultivos en actividad deben informar a la Subsecretaría de Pesca la Caracterización Preliminar del Sitio y las condiciones ambientales (INFA), cumpliendo así con lo estipulado en la Resolución N° 404 del Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción.

Si bien el desarrollo de una normativa medioambiental permite un mejor control por parte del Estado, en muchas ocasiones, el desconocimiento y la falta de entendimiento de los antecedentes, dificulta la correcta toma de decisiones.

A nivel internacional, la utilización de índices de Calidad como herramientas de control y gestión ambiental ha presentado varias ventajas, debido a que son adaptables a distintas situaciones, permiten evaluar de forma combinada diversos efectos y entregan información de amplio entendimiento.

Este Seminario de Título propone la construcción de un Índice de Condición de Fondo (ICF) para estimar la anoxia de los sedimentos a partir de una combinación de datos ponderados aportados por indicadores de calidad ambiental. Los indicadores considerados en el ICF corresponderán a parámetros químicos como pH, Materia Orgánica, Oxígeno disuelto y Potencial Redox que son requeridos por la legislación ambiental vigente.

Una vez construido el ICF, se validará su beneficio evaluando los INFAS durante el periodo 2004-2006 y comparando los resultados obtenidos con la evaluación que realiza Sernapesca para dicha información.

ABSTRACT

Part of the success of fish farming in Chile is due to water quality and environmental conditions that occur in the south of the country. Therefore, preserving the country's natural resources is essential for this industry to maintain its growth levels.

The use of large quantities of fish food, antibiotics, fungicides and anti-fouling paint contributes to the deterioration of the quality of cultivation sites. However, the variety of chemical, physical and biological factors that impact this environment prevents thorough understanding of the system and impedes the possibility of taking quick action in the area.

From a chemical point of view, the sediments offer an array of advantages for evaluating, assessing and/or predicting environmental pollution problems in aquatic ecosystems, as they create a reservoir of substances generated in the water column.

Thus, the Environmental Regulation for Aquaculture uses the development of aquaculture activities as a reference point, in that sediments of the crop present aerobic conditions (i.e. they are oxygenated). Given this, all active sites crops should report to the Sub-secretary of Fishing Environmental Conditions (INFA), thus complying with the provisions of Resolution No. 404 of the Ministry of the Economy, Development, and Reconstruction.

While the development of environmental legislation allows better control by the Chilean State, in many cases, missing information and lack of understanding of the environmental context does not allow the best decision to be made.

Internationally, the use of indexes as a tool to control quality and effect environmental management has several advantages because they work in many

situations, and also assesses various impacts while providing broad information on the subject.

This paper proposes to construct a Condition Index Fund (ICF) to estimate the anoxia of sediments from a weighted combination of data provided by indicators of environmental quality. The indicators considered in the development of the ICF correspond to chemical parameters such as pH, organic matter, dissolved oxygen and redox potential (ORP), as required by environmental legislation.

Once developed, the ICF will be tested by evaluating the benefits of environmental information from various crop centers nationwide during the period 2004-2006, and comparing the results with an assessment by Sernapesca of this information.

I. INTRODUCCIÓN

Desde los inicios de la década de los ochenta, la industria acuícola ha adquirido un gran desarrollo y dinamismo situando a Chile como el segundo productor mundial después de Noruega. Parte del éxito económico de los cultivos acuícolas en nuestro país se debe a sus notorias ventajas naturales. Las condiciones ambientales que se dan en el sur de Chile resultan muy favorables en comparación a otras regiones del hemisferio norte donde también se practica esta actividad. Por un lado, cuenta con vastas extensiones y masas de agua de gran calidad, y por otro, presenta excelentes condiciones bióticas y climáticas, que permiten el crecimiento de variadas especies de cultivo en las distintas zonas del país (Buschmann & Fortt, 2005).

Lo anterior ha dado lugar a que la acuicultura, y especialmente la industria salmonera, durante los últimos 20 años, hayan presentado en nuestro país un explosivo desarrollo, tanto desde el punto de vista económico como tecnológico. Hasta junio de 2008, la cifra de centros acuícolas inscritos alcanzó los 3170 centros distribuidos en todo el país (Sernapesca, 2008). La Región de Los Lagos es la que presenta el mayor desarrollo de esta actividad, contando con más del 67% de los centros; sin embargo, se está expandiendo hacia la Región de Aysén y la de Magallanes debido a que en la anterior los lugares destinados a la acuicultura ya están ocupados (Soto & Norambuena, 2004).

Tantos años de desarrollo de esta actividad han sometido a los ecosistemas del sur de Chile a una intensa modificación en términos de la biodiversidad. Si bien el impacto de la acuicultura ha sido positivo en términos económicos y de empleo, en términos ambientales no ha sido tal. En los últimos años se ha manifestado una

creciente preocupación mundial por los efectos ambientales que provocan estas actividades de cultivo sobre los cuerpos de agua dulce y marinos, siendo posible encontrar una amplia evidencia internacional en la que se indica que la acuicultura genera impactos en los ecosistemas (Karakassis y col, 2000; Carrol y col, 2003; Shakouri 2003; Soto & Norambuena 2004).

Aunque los efectos son específicos para cada sitio, debido a que pueden variar de un lugar a otro, todos los estudios han señalado similares riesgos e impactos, destacando en primer lugar el enriquecimiento orgánico de los sedimentos y su consecuente impacto en los fondos y en la química de éstos (Shakouri, 2003).

Esta situación está asociada básicamente al cultivo de especies de alto nivel trófico (carnívoras) que requieren de la incorporación al medio ambiente de una fuente exógena de energía, que es el alimento (Folke y col, 1998). Este fenómeno aumenta la cantidad de nitrógeno y fósforo de los sistemas acuáticos, disminuyendo el oxígeno disponible, generando eutroficación, estimulando la aparición de algunos organismos y la ausencia de otros, y alterando gravemente la química de los sedimentos.

En los últimos años se ha logrado un progreso considerable en el manejo ambiental de la acuicultura, enfrentando muchas de estas preocupaciones. La presión pública así como los compromisos económicos internacionales y la elaboración de normativas asociadas al rubro han impulsado al sector acuícola a mejorar progresivamente el manejo de sus actividades (Informe País, 2005).

Debido a lo anterior, Chile ha debido desarrollar un marco regulatorio que vaya acorde a las exigencias. A la existente Ley General de Pesca y Acuicultura de 1991 y con la intención de resguardar las condiciones ambientales, la autoridad sectorial promulgó oficialmente en diciembre de 2001 el Reglamento Ambiental para la Acuicultura (RAMA). Este cuerpo legal establece una reglamentación de la actividad en

materia ambiental, entregando estándares ambientales para el funcionamiento de los centros de cultivo, especificando aspectos tales como: distancias entre éstos, medidas de prevención y mitigación de efectos ambientales negativos y la elaboración de informes ambientales en cada centro de cultivo. Además, dicho reglamento plantea dos herramientas de gran interés: la Caracterización Preliminar de Sitio (CPS) y el Informe Ambiental (INFA).

Si bien el RAMA instaura por primera vez una condición habilitante para el ejercicio de la acuicultura, esto es, que no pueden existir condiciones anaeróbicas en fondos y sedimentos, establece algunos mínimos requerimientos para preservar las condiciones naturales del sitio en estudio. Como consecuencia, el RAMA por sí solo no constituye una herramienta de control y gestión en materia acuícola ya que considera la evaluación de parámetros pero no considera el efecto en conjunto que puede causar en el medio.

Debido a lo anterior, resulta necesario desarrollar herramientas de evaluación y control de la contaminación que se basen en argumentos científicos y datos experimentales. Para lograrlo, se han propuesto variadas herramientas entre las que se encuentran la modelación de carga de nutrientes y la utilización de indicadores físicos y químicos de calidad de agua y sedimentos. Estos últimos, constituyen una herramienta que simultáneamente permite evaluar el estado de un factor ambiental (agua, suelo, aire) en su momento actual o prospectivo y en consecuencia, permite diseñar las medidas que contribuyan a mejorar o mantener la calidad ambiental del factor en cuestión.

En consecuencia, la presente tesis pretende entregar una herramienta de gestión aplicable a nivel nacional con la cual evaluar la calidad ambiental de cada sitio de cultivo, considerando la evaluación de indicadores ambientales como materia orgánica,

potencial redox, pH y oxígeno disuelto. Lo anterior se complementa con la revisión detallada de bibliografía referente al tema y la determinación de funciones de calidad *para cada indicador, lo que permitirá expresar el estado de la calidad en buena, regular o mala calidad*. Finalmente, se realizará una validación del método y su comparación de la información ambiental entregada por las mismas concesiones acuícolas a Sernapesca durante los años 2004-2006.

1.1. Generalidades de la contaminación acuícola en el medio acuático.

Tantos años de desarrollo de la acuicultura como actividad industrial han sometido a los ecosistemas a una intensa modificación de sus condiciones naturales. Esto se debe principalmente porque el crecimiento de esta actividad ha sido construido sobre la base de una presión creciente sobre los recursos naturales.

Si bien los impactos ambientales dependen en gran medida de la especie, el método de cultivo, el tipo de alimentación y las condiciones hidrográficas; sus efectos son generalizados y se observan en la columna de agua como en el fondo marino y sus secuelas pueden ser físicas, químicas y biológicas.

La mayoría de las críticas apuntan a evidencias en la destrucción de bancos naturales de organismos y recursos bentónicos; contaminación de aguas y sedimentos por combustibles, fecas de peces, restos de alimentos y actualmente el uso excesivo de fármacos; contaminación de mitílidos (moluscos) y algas; desaparición paulatina del recurso pelágico silvestre debido al pastoreo de individuos que escapan de los centros de engorda; y desarrollo de especies resistentes a la contaminación que pueden resultar dañinas para las especies cultivadas (Borja, 2002).

Específicamente a nivel de sedimentos, la necesidad de contar con una fuente de alimentación exógena en el medio de cultivo, constituye la principal fuente de

contaminación del sitio acuícola. La alimentación y los productos de desechos, tanto orgánicos como inorgánicos, pueden causar un enriquecimiento en nutrientes; un incremento en la demanda de oxígeno; producción de sedimentos anóxicos y de gases tóxicos; e incluso eutroficación en las zonas de cultivo más confinadas.

La Figura 1 muestra algunos flujos e impactos ambientales que puede generar la actividad acuícola. Los impactos ambientales abarcan desde la competencia por el uso del recurso hídrico hasta la presencia de antibióticos y nutrientes, siendo la entrada de materia orgánica a través de la alimentación y sus efectos en los sedimentos, el principal foco de atención.

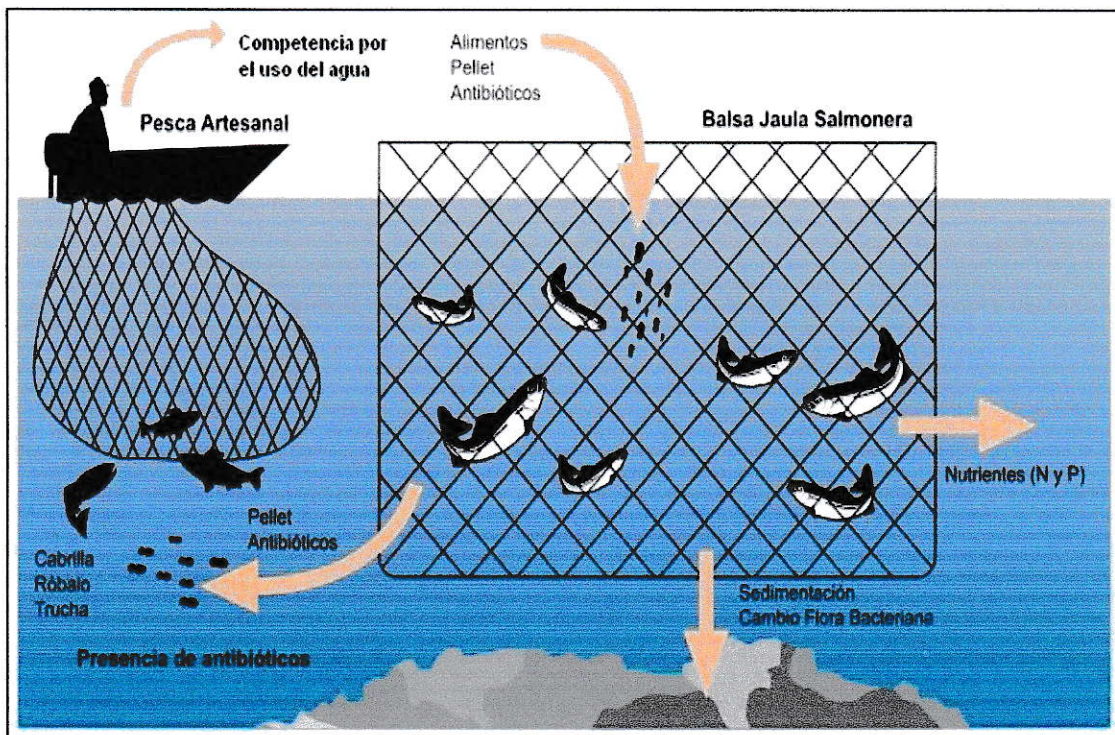


Figura 1: Impactos ambientales producidos por la acuicultura. (Fuente: Oceana).

Con respecto al área de impacto, los efectos no se encuentran muy determinados. Mientras publicaciones disponibles indican que el impacto de la acuicultura en jaulas flotantes es pequeño y altamente localizado (Carroll y col., 2003; Shakouri, 2003; Rudolph y col., 2007) se ha demostrado también que en ciertas ocasiones se puede detectar un impacto significativo en un rango de un kilómetro alrededor de las jaulas de cultivo, siendo éste mayor en el fondo. Además, el alcance del impacto ambiental depende de dos procesos bien definidos: de la capacidad de asimilación y de la cantidad de residuos generados. La primera depende en gran medida a las condiciones ambientales locales (profundidad, tipo de fondo, topografía, corrientes), mientras que la cantidad de residuos está estrechamente relacionada con las prácticas de manejo (densidad de población, tasas de alimentación) (Carroll y col., 2003).

Debido a lo anterior, resulta necesario conocer las características naturales de un potencial sitio de cultivo acuícola, para determinar la capacidad de asimilación que presenta antes de ser intervenido. Sin embargo, lo más importante es mantener una supervisión efectiva del empeoramiento de las condiciones del sitio de cultivo a través de la evaluación periódica de aquellos parámetros que reflejen de forma temprana los cambios que están ocurriendo en la calidad de los sedimentos y de la columna de agua con la finalidad de realizar un seguimiento de las condiciones ambientales en las que funcionan.

1.2. Regulaciones legales de la Acuicultura en Chile.

Dentro del marco normativo vigente a nivel nacional, la acuicultura está sometida al cumplimiento de varias leyes y reglamentaciones, siendo la LGPA N° 18.892 del año 1991 el principal marco regulatorio de la actividad. También debe ajustarse a la Ley de Bases del Medio Ambiente, que en virtud de su artículo 10° letra n) hace aplicable a la acuicultura el SEIA, constituyéndose éste en una fase ineludible para el otorgamiento de una concesión o autorización de acuicultura. Este rubro productivo cuenta además con normativas específicas, que apuntan a regular las concesiones, medidas de prevención y erradicación de enfermedades, navegación, control de la contaminación acuática, entre otras materias.

El Reglamento Ambiental para la Acuicultura es el instrumento fundamental que condiciona los impactos y las medidas de mitigación asociadas a las operaciones de la industria. Este reglamento, dictado en 2001 mediante Decreto Supremo N°320, debe su potestad al artículo 87 de la LGPA, el cual obliga al Poder Ejecutivo a “reglamentar las medidas de protección del medio ambiente para que los establecimientos de acuicultura operen en niveles compatible con las capacidades de los cuerpos de agua lacustres, fluviales y marítimos”. También esta normativa se basa en el hecho que la responsabilidad de la alteración de la limpieza y el equilibrio ecológico de la zona concedida recae en el titular de la concesión.

La consecuencia de este documento es que por primera vez se establece un punto de referencia habilitante para la acuicultura. Esta condicionalidad fija como punto de referencia habilitante para el desarrollo de actividades acuícolas que la concesión de cultivo no supere la capacidad del cuerpo de agua. Se debe entender que se supera la capacidad de un cuerpo de agua cuando el área de sedimentación presenta

condiciones anaeróbicas, situación que indica la ausencia de oxígeno disuelto en el agua intersticial de los primeros 3 cm del sedimento.

Lo anterior implica que, si bien es el titular quien decide sobre el sistema de producción (extensivo-intensivo), los volúmenes de alimentos, la cantidad de especies a cultivar, entre otros aspectos, siempre deberá operar en niveles compatibles a las capacidades de carga de los cuerpos acuáticos donde se instale, conservando la condición aeróbica en las áreas de sedimentación (fondos o zonas directamente bajo las jaulas de cultivo).

También el RAMA incluye dos instrumentos metodológicos para evaluar y conservar las capacidades de los sectores donde se desarrollará la actividad: la Caracterización Preliminar del Sitio (CPS) y la Información Ambiental (INFA).

La CPS corresponde a la determinación de los parámetros y variables físicas, biológicas y químicas del área en que se pretende desarrollar acuicultura. Esto implica que todo nuevo proyecto que ingresa al SEIA deba entregar antecedentes relativos al lugar donde se ubicará el cultivo, caracterizándolo e informando sobre las condiciones del sedimento para saber si son apropiadas. Esta caracterización se presentará a CONAMA para que los respectivos organismos del Estado emitan los permisos ambientales sectoriales necesarios para la ejecución de cada proyecto en particular.

Por otro lado, a todos los centros de cultivo ya existentes, se les exige la presentación del INFA, la cual consiste en la entrega anual de los antecedentes del estado ambiental del centro de cultivo en un momento determinado, basados en la medición de las condiciones del agua, del área de sedimentación y del área circundante a la misma. Esta INFA deberá contener la información ambiental durante el periodo de máxima biomasa en cultivo, considerando el sistema de producción utilizado, así como las producciones anuales proyectadas.

Toda esta información es analizada y evaluada con el objetivo de mantener las condiciones aeróbicas del sedimento, permitiendo asegurar la viabilidad en el tiempo de la biodiversidad presente en el lugar de concesión.

La información ambiental recaudada a través de estas dos herramientas (CPS e INFA) permite evaluar si el sitio de cultivo se encuentra en condiciones aeróbicas o anaeróbicas. Si se presentara esta última condición durante dos años consecutivos en un sistema de producción intensivo, significa que se debe reducir en un 30% el número de ejemplares a cultivar, tomando como base el número de ejemplares que ingresó al centro el año anterior, así mismo, si se presentaran estas condiciones en un sistema de producción extensivo, se debe disminuir en un 30% la biomasa inicial de ejemplares o algas a cultivar. Esta situación se aplicará de manera sucesiva mientras no se restablezcan las condiciones aeróbicas.

Para la implementación de los instrumentos mencionados, durante el año 2003, la Subsecretaría de Pesca publicó la Resolución N° 404 la cual estableció los contenidos y metodologías para elaborar la CPS y la INFA. En esta resolución se establecen cinco categorías de centros de cultivos, las cuales consideran el tipo de sistema de producción, la magnitud de la operación y también las características del ambiente en que se emplaza el centro, es decir, el tipo de fondo y la profundidad del sector.

En la Tabla 1 se resumen las principales características y exigencias que definen a cada una de las categorías de centros de cultivos (las definiciones de los tipos de cultivos se encuentran en el Anexo 1):

Tabla 1: Clasificación de Centros de cultivos según Resolución N° 404/03.

CATEGORÍA	TIPO DE CULTIVO	PRODUCCIÓN MÁX. (ton/año)	TIPO DE FONDO	PROF. (m)
1	Extensivo de fondo	---	---	---
	Extensivo suspendido	≤ 300	Blando	≤ 60
2	Extensivo suspendido	301 – 750	Blando	≤ 60
	Intensivo	≤ 50	Blando	≤ 60
3	En cuerpo de agua terrestre	---	Blando	≤ 60
	Extensivo suspendido	> 750	---	≤ 60
	Intensivo	> 50	Blando	< 60
4	Intensivo	---	Duro/Semiduro	≤ 60
5	Todo tipo de cultivo	---	---	> 60

Para cada categoría, se establecen además los parámetros que funcionan como indicadores de las condiciones ambientales del sitio, y que por tanto, deben informarse en la CPS como en el INFA. Estos parámetros corresponden a variables de tipo Físico (Batimetría, Correntimetría, Granulometría), Biológicos (Macrofauna Bentónica) y Químicos (Contenido de Materia orgánica, pH, Potencial Redox y Oxígeno disuelto), además, en algunos casos se complementa la información con el registro visual del área de sedimentación.

La Tabla 2 describe los parámetros de evaluación por categoría de cultivo. En ella se puede observar que cada categoría tiene su selección de parámetros y éstos dependen principalmente por las condiciones del sitio. Aquellos sitios con sedimentos blandos y utilizados con fines de cultivo intensivo necesitan de una mayor cantidad de parámetros a evaluar que aquellos de fondos duros e intensivos.

Tabla 2: Requisitos de parámetros para la CPS e INFA según categoría establecida en resolución N° 404/03.

CATEGORÍA	1		2		3		4		5	
	CPS	INFA	CPS	INFA	CPS	INFA	CPS	INFA	CPS	INFA
Batimetría	X	-	X	-	X	-	X	-	X	-
Correntometría	X	-	X	-	X	-	X	-	X	-
Granulometría	X	X	X	X	X	X				
M. Orgánica	X	X	X	X	X	X				
M. Bentónica			X		X	X				
pH					X	X				
P. Redox					X	X				
O ₂ disuelto					X	X			X	X
Registro Visual							X	X		

Finalmente, esta resolución entrega las instrucciones para determinar la ubicación del lugar de muestreo y define la determinación del número de estaciones de muestreo. Además, entrega las metodologías autorizadas para realizar el muestreo y análisis de cada uno de los parámetros.

1.3. Los sedimentos como receptores de contaminantes.

Los sedimentos son considerados como un resumidero de una gran cantidad de sustancias y elementos químicos de origen natural o generados por diferentes actividades antrópicas. El estudio de su composición y distribución vertical permite conocer la actividad geoquímica e historia de los procesos sedimentarios de un sitio, reflejando el efecto que provocan las entradas de contaminantes y cambios de

acumulación a lo largo del tiempo, lo cual entrega una visión sobre como la acumulación de contaminantes puede variar en el espacio.

La matriz que compone el sedimento es bastante compleja y consta de fases detríticas de diferentes tamaños (arena, grava y arcilla), además de presentar una composición química rica en fragmentos de rocas, precipitados tales como $\text{Fe}(\text{OH})_3$, SiO_2 y CaCO_3 , óxidos de hierro y manganeso, silicatos y materiales orgánicos de origen natural (microorganismos, organismos de mayor tamaño, detritus y restos de macrófitas), los cuales son transportados por agentes de transporte como corrientes de agua y viento, para finalmente ser depositados en las partes bajas de cuerpos de agua (García, 1998).

La contaminación de los sedimentos, se debe generalmente al ingreso de especies contaminantes a cuerpos de aguas naturales mediante descarga directa (industrial y urbana), escurrimientos superficiales agrícolas, mineros, industriales y desde sitios de disposición de residuos y acumulación atmosférica húmeda (lluvia y nieve) y seca (aerosoles y partículas), las cuales subsecuentemente se asocian al material particulado en suspensión, que resulta finalmente en un depósito en el sedimento del lecho (Samamé, 2002).

Las diversas interacciones que ocurren entre las partículas del sedimento y el agua que las rodea, controlan la transferencia de especies contaminantes a través de la interfaz sedimento-agua. La partición de contaminantes entre las partículas y la fase agua depende en gran medida de la cantidad de carbono orgánico, tamaño y composición de la partícula, especie química de contaminantes y propiedades fisicoquímicas.

El transporte y el descenso de nutrientes y sustancias contaminantes tóxicas hacia los sedimentos, están determinados por la asimilación de la biota y procesos

químicos de sorción, intercambio catiónico, precipitación, coprecipitación, complejación, quelación y oxidoreducción. Sin embargo, no todas las reacciones son posibles en todos los sedimentos, ya que dependen de condiciones ambientales como pH y potencial redox (Golterman, 1983; Stumm, 1994 En Samamé, 2002).

La importancia de los sedimentos como portadores y/o potenciales fuentes de contaminantes en los ecosistemas acuáticos ha sido reconocida por la comunidad internacional desde la década de los años 60 del pasado siglo XX. Es por ello que los sedimentos han sido ampliamente utilizados en distintas zonas del Planeta, como una matriz con grandes ventajas para evaluar, estimar y/o predecir problemas de contaminación ambiental en ecosistemas acuáticos tanto costeros como de ríos.

Los sedimentos constituyen una matriz ambiental altamente sensible, ya que simultáneamente pueden:

- Recibir las influencias de las zonas marinas adyacentes (agua) ya sea por el vertido directo de contaminantes a las aguas o por el arrastre de contaminantes disueltos o en suspensión por las corrientes de aguas; o por la incorporación al agua de compuestos que favorezcan la movilidad de los contaminantes.
- Acumular contaminantes depositados como material sólido o en suspensión los que pueden quedar adheridos a los organismos que viven en el sedimento o parcialmente enlazados a los compuestos orgánicos naturales de los sedimentos.
- Redisolver contaminantes acumulados en momentos anteriores al cambiar las condiciones físicas y químicas de las aguas adyacentes.
- Desarrollar condiciones que propicien la vida o que la deterioren totalmente.

De todo lo anterior, se concluye que un estudio completo de sedimentos es una tarea de investigación altamente compleja, con la participación de especialistas de formación variada y además, estrechamente vinculada a lugares específicos, resultando difícil de ejecutar. Es necesario entonces desarrollar herramientas de control que sean capaces de evaluar de forma rápida y efectiva la calidad de los sedimentos y de esta forma ayudar en la toma de decisiones acerca del medioambiente.

1.4. Índices como herramientas de control y gestión ambiental.

En los últimos años, el tema ambiental ha evolucionado desde una perspectiva reactiva, correctiva y aislada, hacia una aproximación proactiva, preventiva y colaborativa. En dicho contexto se ha trabajado en abordar los problemas ambientales generados por la Acuicultura, sin perder de vista el concepto de Desarrollo Sustentable, en el cual se establece la necesidad de utilizar los recursos naturales para satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer sus propias necesidades.

Sin embargo, a 30 años de iniciada su actividad en forma intensiva y programada, se desconoce aún la dimensión real de los efectos causados. Las razones de este desconocimiento se deben a que no se han aplicado herramientas confiables que permitan su comprensión y a que la mayoría de los estudios han sido efectuados por las propias empresas productoras con fines privados.

Debido a lo anterior, se ha detectado la necesidad de cuantificar y evaluar la calidad de los recursos naturales utilizados en esta actividad comercial. Para lograr esto, es cada vez más necesario que la ponderación de los efectos ambientales

ocasionados se realice sobre la base de estudios aplicados con técnicas poderosas de análisis de información, las cuales permitan obtener resultados concluyentes.

Hasta ahora, la manera más común de estimar la calidad ambiental ha sido a partir de la medición de parámetros (físicos, químicos y biológicos) y su comparación con criterios definidos como estándares de acuerdo al uso del recurso. Si bien ésta es la forma más usual, genera una serie de datos individuales y no entrega una visión integrada del estado de la calidad. Además, debido a las diferencias de interpretación entre los encargados de tomar decisiones, la interpretación de los datos obtenidos no siempre es la correcta.

Con la finalidad de realizar un mejor análisis a los criterios antes descritos, a nivel internacional existe un esfuerzo creciente para generar nuevas herramientas de gestión para medir los problemas ambientales y la sustentabilidad de éste. Un ejemplo de estas nuevas herramientas es la utilización de *"Indicadores Ambientales"*, los cuales surgieron como respuesta a la creciente preocupación por los aspectos ambientales del desarrollo económico. Así como los indicadores económicos o sociales, los indicadores ambientales ofrecen información más allá del dato mismo, permitiendo un conocimiento más acabado de la realidad que se pretende analizar.

Según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico, un indicador es *"un parámetro, o el valor resultante de un conjunto de parámetros, que ofrece información sobre un fenómeno, y que posee un significado más amplio que el estrictamente asociado a la configuración de parámetro"* (OCDE, 1993).

Para que un parámetro cumpla con la función de Indicador, debe cumplir algunos requisitos fundamentales. Algunos de estos son:

- Deben basarse en la validez científica. Es decir, el conocimiento científico de las relaciones de causalidad, sus atributos y su significado deben estar bien fundamentados.
- Deben ser sensibles a cambios, en la medida que deben señalar cambios de tendencia en las situaciones que representan, preferiblemente en el corto plazo (Ver Figura 2).
- Deben ser predictivos, de forma tal que brinden señales de posibles tendencias futuras de lo que miden.
- Deben ayudar a la toma de decisiones y permitir comparaciones en distintas condiciones.

La Figura 2 representa el comportamiento ideal que debe cumplir un Indicador Ambiental. Un buen indicador debe responder continuamente a la intensidad de una perturbación; por ejemplo, en algún momento de la curva el ecosistema se verá adversamente afectado y el valor del indicador en ese punto será utilizado como un criterio para tomar una decisión que permita establecer por un lado un enfoque preventivo para evitar el punto en que el ecosistema sea dañado o estimar el valor límite para un ecosistema.

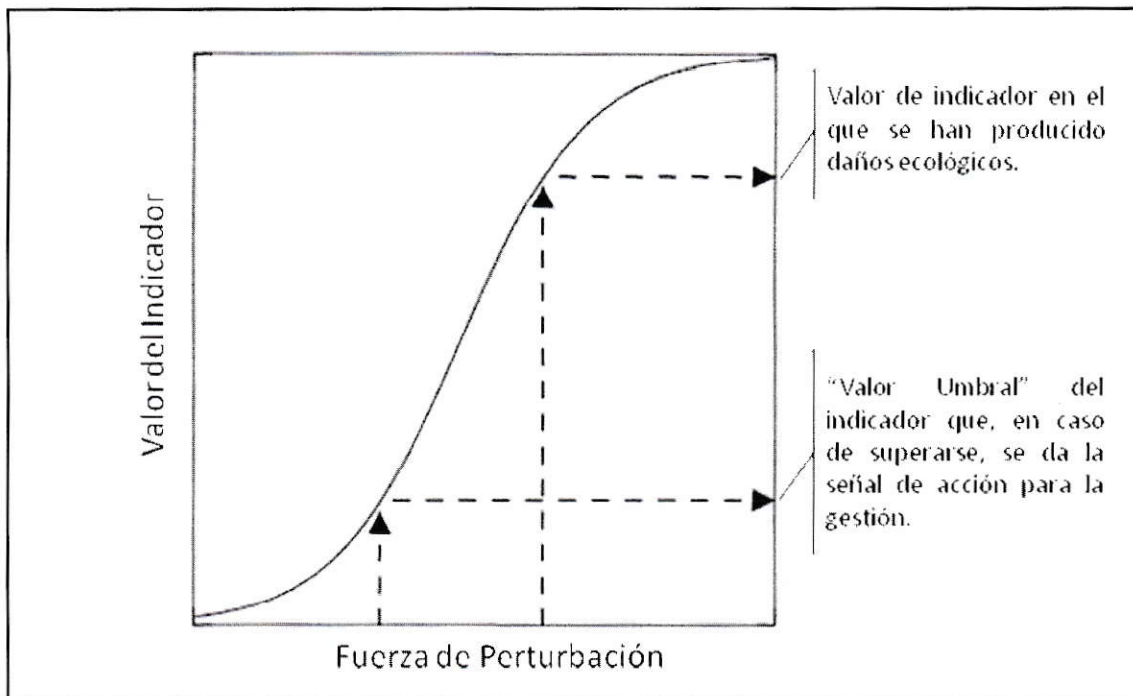


Figura 2: Descripción gráfica de la relación entre la respuesta del indicador, el grado de la perturbación y el umbral para la acción de gestión o decisión (ANZECC, 2000).

Debido a que los indicadores ambientales tienen la capacidad de generar una imagen sintética de las condiciones ambientales y permitir por lo tanto resumir una gran cantidad de datos para facilitar la comunicación de las situaciones ambientales a diferentes grupos sociales, han adquirido gran relevancia en los últimos años (Escobar, 2006).

A través de la evaluación de Indicadores Ambientales se puede monitorear la sostenibilidad de la relación Hombre-Naturaleza. Para ello se puede agrupar distintos indicadores en una función matemática ponderada denominada "*Índice de Calidad*", el cual es una herramienta cuantitativa que simplifica un modelo multivariable, con la intención de proporcionar una explicación más amplia de un recurso. Los Índices de

calidad ambiental constituyen una herramienta que simultáneamente permite evaluar el estado de un factor ambiental (agua, aire, suelo) en su momento actual o prospectivo y en consecuencia, permite diseñar las medidas que contribuyan a mejorar o mantener la calidad del factor en cuestión.

Un índice puede ser considerado como la agregación de indicadores, los cuales se obtienen de manera experimental o a través de la recopilación de datos; tal como se muestra en la Figura 3.

La generación de Índices para medir los problemas ambientales es reciente. Sin embargo, la utilización de Índices para evaluar el deterioro en la calidad del medio ambiente es una manera útil de comunicar y evaluar la situación actual del sistema. Particularmente populares resultan por ejemplo, los índices de calidad de aire referido a partículas (ICAP) y su vinculación con las medidas operativas de restringir el tránsito de vehículos sin convertidor catalítico; el Índice de calidad de agua superficiales (ICAS); y recientemente, la utilización de un Índice de contaminación metálica en sedimentos marinos (Castillo, 2009).

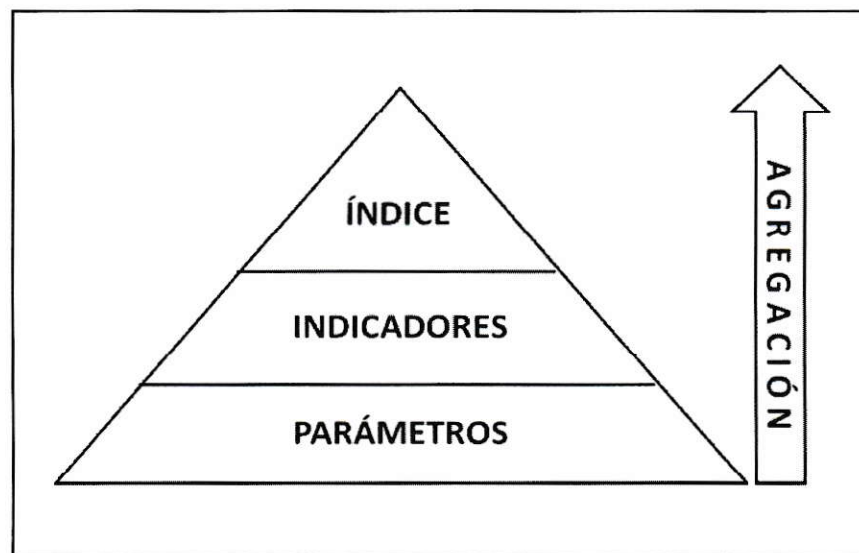


Figura 3: Pirámide de organización de la información (PNUMA, 2001).

A pesar de que un Índice puede considerarse un modelo simplificado de las variables que tienen participación en la realidad, debido a que en su confección es necesario sacrificar parte de la información debido al contexto y su importancia, estos Índices presentan la gran ventaja de proveer mayor información acerca de un fenómeno o proceso, debido a que posee un significado más amplio que el estrictamente asociado a los parámetros en forma individual. Esto quiere decir que la evaluación de un Índice permite visualizar el estado general de calidad de una matriz ambiental en su momento actual, y en consecuencia permitiría diseñar las medidas que conduzcan a preservar o mejorar la calidad ambiental de la matriz en cuestión.

Otras ventajas significativas de la utilización de Índices de Calidad en la evaluación ambiental radican en que: se pueden adaptar a distintas situaciones de uso o a distintas situaciones geográficas; permiten evaluar de forma combinada distintos efectos; permiten evaluar de forma ponderada, a partir de la asignación de importancias relativas para los distintos impactos a que está sometido el medio; permiten una descripción tanto cualitativa como cuantitativa de fácil comprensión y permite establecer metas para preservar o mejorar la calidad.

La elaboración de un Índice de Condición de Fondo (ICF) que determine la condición en que se encuentran los sedimentos obtenidos desde zonas de cultivos de distintas especies acuícolas, en función de variables ambientales, se convertirá en una gran herramienta de gestión que ayude en la toma de decisiones a quienes les corresponda, con el beneficio de actuar con anticipación al daño en un determinado ecosistema. Esto facilitaría a que las acciones de gestión puedan ser implementadas a tiempo para prevenir que el ecosistema comience a ser afectado. De este modo, el Índice de Condición de Fondo cumple un rol preventivo inmediato para conocer y mejorar la condición actual de los sedimentos.

1.5. Hipótesis.

Un Índice de Condición de Fondo permitirá una evaluación integral y objetiva de la condición de anoxia de los sedimentos acuícolas y contribuirá a mejorar la toma de decisiones ambientales en esta industria, sentando las bases para un programa de prevención de la contaminación en los sitios de cultivo acuícola.

1.6. Objetivo General.

Construir un Índice de Condición de Fondo (ICF) para las cinco categorías de sitios de cultivo acuícolas, a partir de una combinación de datos ponderados aportados por indicadores de calidad ambiental como pH, materia orgánica, oxígeno disuelto y potencial redox.

1.7. Objetivos Específicos.

- Establecer funciones de calidad para cada uno de los parámetros considerados: pH, potencial redox, materia orgánica y oxígeno disuelto.
- Evaluar los datos reportados para cada una de las funciones desarrolladas para cada indicador.
- Establecer las condiciones de contorno que permitan desarrollar fórmulas del Índice de Condición de Fondo para estimar la anoxia en centros de diferente categoría
- Ponderar en una sola expresión matemática la importancia relativa de cada indicador.

- Comparar los efectos ambientales de la utilización del Índice de Condición de Fondo propuesto versus la evaluación actual desarrollada por la Subsecretaría de Pesca.

II. METODOLOGÍA

2.1. Protocolo general para el desarrollo de un Índice ambiental.

La metodología utilizada en la construcción del Índice de Condición de Fondo se basa en siete puntos o etapas determinantes y bien definidas:

1. Identificación y descripción del objetivo del Índice.
2. Identificación de parámetros descriptivos del estado de los factores ambientales para los cuales se va a diseñar el Índice (o sea, agua, aire, suelo, etc.).
3. Establecer las distintas funciones de estado de calidad para cada uno de los parámetros considerados. Estas funciones se establecen sobre la base de criterios de expertos y considerando las funciones descritas en literatura. De este modo, se transforman cada una de las mediciones experimentales (con sus unidades respectivas) en funciones, de modo que todas las mediciones experimentales, independientemente de su orden de magnitud, se traducen en escalas comparables de 0 a 100% de calidad o estado óptimo deseable (0% de calidad se traduce en condición mala o no aceptable, mientras que 100% de calidad se traduce en la mejor calidad posible).
4. Establecer las ponderaciones a considerar. Es posible considerar que los parámetros incluidos en el Índice tienen la misma importancia o peso. Pero también es posible asignar pesos diferenciados sobre la base de que

aquellos parámetros cuya variación afecta de manera más significativa la calidad del medio, van a tener mayor importancia (y por tanto mayor peso o significado dentro del total) mientras que aquellos parámetros cuya variación resulte en poca modificación del estado total se les puede considerar como de menor importancia o peso. La suma de todos los pesos debe ser igual a 1.

5. Combinar los parámetros (como funciones de calidad) con sus pesos en una única fórmula. Se han descrito fórmulas que consideran la sumatoria de los factores o también la productoria o efecto multiplicativo de los factores. Se puede elegir entre una u otra según los criterios de expertos del fenómeno analizado.
6. Establecer las escalas para los distintos resultados obtenidos en la evaluación del índice. Esto es: establecer aquellos valores numéricos del índice que corresponden a las distintas situaciones o calidades (Buena, Regular, Mala, etc.).
7. Validar el Índice a partir de datos de prueba, no empleados en la generación del mismo corroborando los supuestos iniciales.

2.2. Selección de Indicadores ambientales.

En la literatura sobre índices ambientales se enfatiza que la selección del conjunto de indicadores apropiados para modelar un problema no es una tarea fácil, dado que ello demanda el entendimiento de cómo funciona el sistema o fenómeno que se quiere explicar, y esto no siempre es posible cuando se trabaja con el medio ambiente (Escobar, 2006). Por ello, la selección de indicadores obedece no sólo a la interpretación que el científico y la sociedad hagan de una realidad, de por sí compleja,

sino también a la disponibilidad de la información en un marco analítico que la interprete.

Para la construcción de este ICF se utilizarán como indicadores ambientales los parámetros exigidos por el decreto N° 404/03 según cada categoría. Debido a que este Índice se focaliza en la determinación de la calidad química del sedimento y de la columna de agua, sólo se considerarán aquellos parámetros que reflejen una directa relación con los cambios químicos, siendo éstos la determinación de la materia orgánica, potencial redox, pH y oxígeno disuelto.

Como los efectos de la contaminación no son iguales en todos los sitios debido a diferencias en los tipos de fondos, en las profundidades o en la capacidad máxima de especies, la combinación de uno o varios de los indicadores antes descritos dependerá de la clasificación por categorías dispuesta en la resolución N° 404/03 cuyo detalle se puede observar en la Tabla 3:

Tabla 3: Distribución de indicadores según categorías establecidas en Res. N° 404/03.

		CATEGORÍAS DE CULTIVOS				
		1	2	3	4	5
INDICADORES	Materia Orgánica en Sedimento	X	X	X		
	pH en Sedimento			X		
	Potencial Redox en Sedimento			X		
	Oxígeno disuelto en la columna de agua			X		X

Para el caso particular de la categoría 4, no se evaluará ningún indicador debido a que los sedimentos de estos sitios de cultivos corresponden a fondos duros y de gran profundidad, por lo tanto no se encuentran expuestos al empeoramiento de sus condiciones ambientales.

Dado que la naturaleza de cada uno de los indicadores es distinta en cuanto a magnitud y unidad de medición, deberán ser estandarizadas bajo una escala única de magnitudes. De esta manera, cada Indicador va desde un rango mínimo de 1% a un rango máximo de 100%, estableciéndose además categorías intermedias siguientes:

CONDICIÓN Y/O CALIDAD	VALOR FC(%)
Buena	100 – 80
Regular	79 – 50
Mala	49 - 1

2.3. Selección de Valores referenciales.

Para la construcción de la función de calidad para cada indicador, se utilizarán datos referenciales obtenidos de bibliografía. Debido a que nuestro país no cuenta con muchos estudios o publicaciones vinculadas al monitoreo de condiciones ambientales en cuerpos de agua utilizados como sitios de cultivos, se debió recurrir a valores referenciales internacionales que cumplan con similares características geográficas a las situadas en las zonas de cultivos de nuestro país.

2.4. Base de Datos.

Los datos utilizados en la validación del ICF para cada una de las categorías corresponden a la base de datos de Sernapesca, construida a partir de los INFAS entregados por los mismos concesionarios durante los años, 2004, 2005 y 2006.

Debido a que los datos a utilizar provienen de estudios privados, se supondrá que estos cumplen con todas las recomendaciones de muestreo contenidas en el

decreto N° 404/03 en relación a representatividad del área de muestreo y condiciones de análisis.

2.5. Protocolos de Análisis

Debido a que no se realizaron los análisis de determinación de contenidos de materia orgánica, pH, Potencial Redox y Oxígeno Disuelto, sino que se utilizaron directamente los datos informados por cada centro de cultivo, la metodología autorizada según el reglamento RAMA vigente no se incluye en el cuerpo principal de este escrito. Sin embargo, se puede disponer de los protocolos generales de análisis en el anexo 2 de este trabajo.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Antecedentes del Indicador Materia Orgánica (% MOT).

3.1.1. Antecedentes Bibliográficos.

El mayor impacto ambiental de la acuicultura en su entorno es la incorporación de grandes cantidades de materia orgánica al medio acuático (Karakassis y col., 2000; Mazzola y col., 2000; Molina & Vergara, 2005). Esta materia orgánica presenta diversas funciones químicas, lo que le otorga variadas propiedades a sus átomos constituyentes. Entre los compuestos orgánicos de frecuente aparición en aguas están los halogenados, hidrocarburos aromáticos, ácidos grasos, aminas y amidas, derivados fenólicos, etc. (Marín, 2003).

El aumento de materia orgánica bajo los sistemas de cultivo ha sido constatado tanto en cuerpos de agua continentales como en zonas costeras. Los principales efectos de este enriquecimiento orgánico radican en la producción de cambios en la columna de agua; alteración en el fondo como consecuencia de la sedimentación de fecas y desechos del alimento entregado a los peces y un efecto significativamente negativo sobre la biodiversidad (Karakassis y col., 2000; Buschmann, 2001; Vita y col., 2002; Soto & Norambuena, 2004). Este último, se ve reflejado en una reducción de la diversidad biológica de los microorganismos y en una disminución de la meiofauna debajo de jaulas de cultivo de hasta un 70% de la densidad (Mazzola y col., 2000).

En condiciones ideales, debería existir un equilibrio entre la cantidad de carbono orgánico fijada por los productores primarios y la cantidad que es descompuesta por los microorganismos. Cuando se incluye a este equilibrio una carga adicional de materia orgánica, éste comienza a verse afectado. La descomposición microbiana de la

materia orgánica acumulada en los sedimentos libera nutrientes al agua intersticial, que por procesos difusores o de advección, pueden ser reintroducidos en el agua que se encuentra sobre ellos (Hermosilla y col., 2005). Además, el enriquecimiento del sedimento con materiales orgánicos, conlleva a un aumento en el consumo de oxígeno por parte de los organismos encargados de la oxidación de estos compuestos, teniendo como consecuencia la disminución del contenido de oxígeno disuelto necesario para la sobrevivencia de la fauna y creando condiciones de hipoxia y anoxia en áreas donde ésta sedimenta.

Debido a que el contenido de materia orgánica es un factor controlador del nivel de contaminación, porque presenta una alta capacidad de adsorción (Rudolph y col., 2007), se estima conveniente determinar su valor de manera de evaluar la capacidad de los sedimentos de retener contaminantes. En ambientes oxidados, donde los niveles de oxígeno disuelto en el agua suprayacente son superiores a 1,0 mL/L, la materia orgánica se halla entre un rango de menos de 0,5% a un máximo de 3,0 – 4,0% (Demaison & Moore, 1980); mientras que en ambientes reducidos el contenido de materia orgánica es significativamente mayor, desde 1,0% hasta 20% y más.

Finalmente, es de gran importancia hacer hincapié en la fracción particulada de la materia orgánica, ya que ésta puede cumplir una función de transportador y reservorio de contaminantes. El importante rol que el material particulado tiene en la calidad de las aguas y sedimentos se debe a la tendencia de las sustancias contaminantes, de baja solubilidad en agua (hidrofóbicos), a incorporarse al material particulado. La tendencia de los contaminantes de asociarse con el material particulado aumenta mientras la relación de materia orgánica a inorgánica crece y mientras el tamaño de las partículas decrece.

Las formas más importantes bajo las cuales los contaminantes pueden presentarse en el material particulado son: adsorbidos sobre el particulado, ligados al material orgánico formando complejos solubles e insolubles, ocluidos en óxidos de Fe y Mn, incluidos en la matriz mineral de minerales específicos y en silicatos y otros minerales inalterables (Craig, 1986; Calmano y col., 1993; Förstner, 1993 En: Samamé, 2002).

3.1.2. Valores de Referencia y de Ajuste

A continuación se presentan distintos valores referenciales de contenido de materia orgánica en zonas de estudio de similares características y zonas expuestas a descargas producto de la actividad acuícola (Tabla 4).

Tabla 4: Valores referenciales de contenido de Materia Orgánica (%).

Zona de Estudio	Materia Orgánica (%)		Situación
Fiordos y canales australes de Chile ¹	0,1 – 11		Se observa un incremento del contenido de MOT en canales centrales y oceánicos por sobre fiordos y canales cercanos a glaciares. No se atribuye a actividades puntuales, sino más bien a efectos naturales (origen planctónico).
Fiordos y canales interiores entre Golfo de Reloncaví y Golfo Corcovado ²	3,36 4,86 6,34	4,62 5,91 7,04	Se reconoce el efecto de la acuicultura local en la acumulación de Materia Orgánica pero se estima que su efecto es localizado. Además, reconoce que la acumulación y oxidación de MOT producen cambios en la cantidad de O ₂ disuelto en la columna de agua.
Canales interiores entre Puerto Montt y Laguna San Rafael ³	0,6 1,1 1,5	3,9 9,3 11,4	Datos extraídos de la primera evaluación a la matriz sedimentaria (Crucero Cimar Fiordos I). Los valores más altos (> 8%) se encontraron en la parte norte del seno de Reloncaví, golfo de Ancud y boca del canal Dalcahue (zonas altamente explotadas por cultivos acuícolas).

¹Silva y col., 2001; ²Rudolph y col., 2007; ³Ramírez y col., 1995.

También se recopilaron referencias internacionales de zonas influenciadas por cultivos acuícolas, encontrándose los valores de MOT contenidos en la Tabla 5:

Tabla 5: Valores referenciales de contenido de Materia Orgánica (%) en zonas impactadas por cultivos.

Zona de Estudio	Materia Orgánica (%)	Situación
Cultivo de peces en la Isla de Córcega, Francia. ¹	24 (Bajo las jaulas) 22 (a 20 m de distancia) 21 (a 100m de distancia) 2 (a 2 km de distancia)	Se observan grandes diferencias en el contenido de MOT, dependiendo de la cercanía a los sitios de cultivos y sus alrededores.
Mar Menor (SE de España) ²	2,23 2,43 3,05 3,08 3,17 8,17	Se trata de valores de MOT en una zona de estudio que no tiene intervención de cultivos. Este trabajo evaluó la calidad ambiental de fondos blandos que sólo tienen influencia de antiguas actividades mineras.
Zonas marinas bien ventiladas en la Bahía de Cherburgo, Francia. ³	48,53 (Bajo las jaulas) 13,86 (10 m de distancia) 13,12 (20 m de distancia) 8,41 (a30 m de distancia) 10,35 (Ref. a 300 m)	Queda de manifiesto el notorio aumento del contenido de MOT la estación bajo las jaulas de cultivo. Estos resultados muestran que los residuos de la explotación acuícola están presentes debajo de las jaulas, pero al alejarse de éstas, el contenido en las otras estaciones es considerablemente más bajo.
Cultivos en Mediterráneo Occidental ⁴ .	1,5 (control a 500 m) 1,8 (en las instalaciones de cultivo)	Se observan diferencias poco significativas entre la zona de control y la zona intervenida por cultivos de baja producción.

¹ Cancemi y col., 2003; ² Marín Guirao y col., 2005; ³ Kempf y col., 2002; ⁴ Hermosilla y col., 2005.

3.1.3. Criterios de Corte

Para el caso de la materia orgánica los puntos críticos que delinearán la función de calidad se establecieron de la siguiente forma (Tabla 6).

Tabla 6: Criterios de Corte para la Función de Calidad de Materia Orgánica.

Materia Orgánica (%)	Función de Calidad (%)
2	100
3	80
4	50
12	1

Esta distribución concuerda con la clasificación de sitios según los niveles de MOT que presentan los sedimentos en el Informe FIP de 2006 (IFOP, 2006). Igualmente incorpora el criterio ofrecido en el Informe País del Estado del Medio Ambiente en Chile relativo a que la calidad considerada buena para los sedimentos de la X Región es de 2% de materia orgánica.

3.1.4. Función de Calidad para Materia Orgánica

Con los datos referenciales ya presentados, el ajuste matemático realizado arrojó la siguiente función:

$$y = A_1 \times \text{Exp}\left(\frac{-x}{t_1}\right) + A_2 \times \text{Exp}\left(\frac{-x}{t_2}\right) + y_0$$

Donde,

y_0	=	-4,6796
A_1	=	97,09625
t_1	=	3,33921
A_2	=	97,09625
t_2	=	3,3392

El esbozo de la curva de ajuste se muestra en la Figura 4. Dado que los puntos críticos graficados presentan dos pendientes claramente definidas, la mejor representación correspondió a la de un decaimiento exponencial de segundo orden.

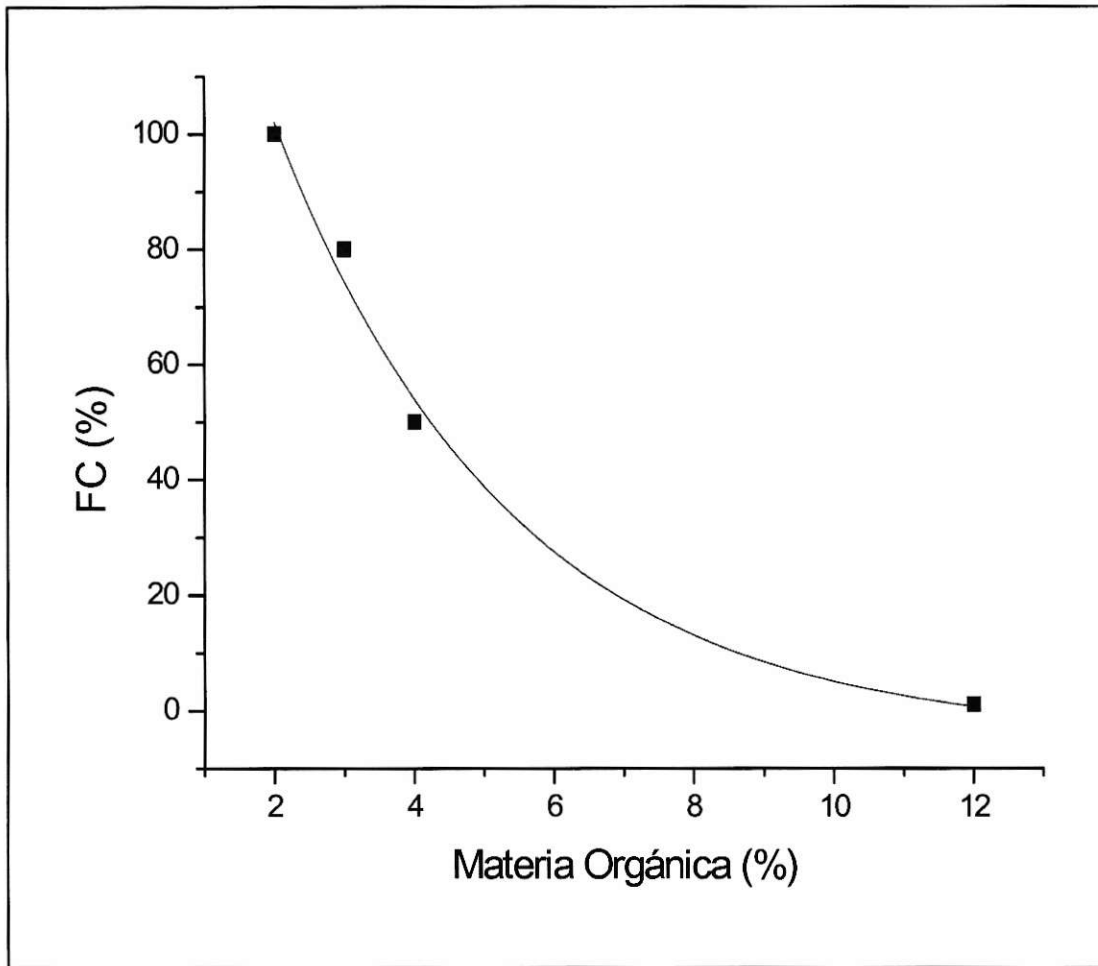


Figura 4: Curva de ajuste para la función de calidad del indicador Materia Orgánica.

3.2. Antecedentes del Indicador Potencial Redox (Eh).

3.2.1. Antecedentes Bibliográficos.

El Potencial Redox mide la capacidad de un agua de proceder por sí misma a la oxidación o reducción de sustancias presentes en ella, indicando la tendencia a la reversibilidad del sistema redox (Marín, 2003; Ríos y col., 2003). Esto quiere decir que las reacciones redox que ocurren en el medio acuoso implican un cambio neto en el estado de oxidación formal de los elementos involucrados. Las especies reductoras son capaces de donar electrones y las especies oxidantes son capaces de aceptar electrones. Los electrones libres no pueden existir en soluciones acuosas por lo que toda oxidación debe ser acompañada por una reducción y viceversa:



Dependiendo de las condiciones fisicoquímicas de los diferentes pares redox que dominan el sistema, se determina una diferencia de potencial (Eh) que puede ser medido mediante un electrodo. En un medio acuático, un valor Eh positivo y de alta magnitud es indicativo de un ambiente que favorece las reacciones de oxidación (contendrá apreciable cantidad de oxígeno y compuestos en estado oxidado: Fe^{+3} , Mn^{+4} , SO_4^{-2} , NO_3^- , PO_4^{-3} , CO_2 , etc.), por otro lado, un valor Eh negativo y de baja magnitud es indicativo de un ambiente reductor (contendrá abundantes compuestos en estado reducido: S^{-2} , NH_4^+ , CH_4 , etc.; además de materia orgánica difícilmente mineralizables y bajas cantidades de oxígeno).

Cuando hay oxígeno en el medio, éste actúa como aceptor de electrones y su producto final es H_2O . Esto ocurre a valores de Eh positivos. En la medida que el oxígeno deja de ser el elemento aceptor de electrones, se producen compuestos tóxicos reducidos como sulfuro de hidrógeno (H_2S), metano (CH_4), ya que si se

producen en suficiente cantidad pueden ser liberados del sedimento a la columna de agua. En estas condiciones, se registran valores de potencial redox más negativos.

En los sedimentos, el Eh es uno de los factores más importantes ya que determina la estabilidad y la transformación bioquímica de la materia orgánica, así como la distribución, tipo y actividad fisiológica de las bacterias y otros microorganismos que se encuentran en los sedimentos (Ríos y col., 2003).

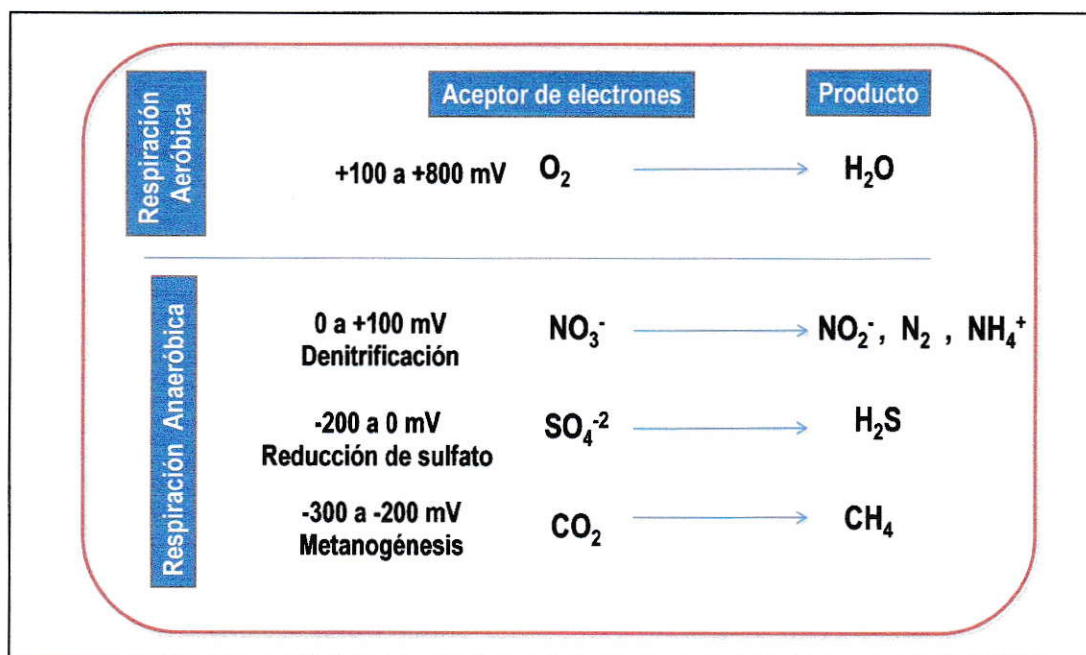


Figura 5: Perfil vertical de Potencial Redox en sedimentos.

En ambientes acuosos naturales el número de pares redox que contribuyen al potencial redox es limitado y se relaciona principalmente con Fe^{+3}/Fe^{+2} , Mn^{+4}/Mn^{+2} , SO_4^{2-}/HS^- , O_2/H_2O_2 , O_2/H_2O , CO_2/CH_4 , así como algunas sustancias orgánicas complejas que pueden contribuir al potencial.

El potencial redox también afecta la distribución y la actividad metabólica de microorganismos. La distribución espacial de microorganismos aerobios y anaerobios

está determinada principalmente por el potencial redox del ambiente. Los microorganismos aerobios estrictos son metabólicamente activos a potenciales redox positivos, mientras que los anaerobios estrictos (ej. Metanobacterias) demuestran actividad metabólica, sólo a potenciales redox negativos.

Finalmente, el potencial redox ha sido un parámetro común para la descripción de sedimentos con deficiencia de oxígeno y orgánicamente enriquecidos, condiciones muy comunes en los sitios acuícolas ya que existen antecedentes que señalan que los sedimentos acuícolas se caracterizan por poseer bajos valores de potencial redox.

3.2.2. Valores de Referencia y de Ajuste

A continuación se presentan valores referenciales de Potencial Redox (mV) en zonas expuestas a descargas producidas en actividades acuícolas:

Tabla 7: Valores referenciales de Potencial Redox (mV) en zonas impactadas por cultivos.

Zona de Estudio	Potencial Redox (mV)		Situación
Zona de Cultivos en las costas de Noruega ¹ .	-125 -170 -184	-171 -128	Se observan valores de Eh negativos para las estaciones inmediatamente bajo las jaulas. Los valores de las estaciones de referencia (entre 300–1000 m aguas arriba) fueron en todos los casos mayores a 100 mV.
Cultivos en Mediterráneo Occidental ²	-43,1 (control a 500 m) -138,7 (Instalaciones de cultivo)		Los sedimentos inmediatamente bajo las jaulas de cultivo se caracterizan por bajos valores de potencial redox. Se observa además una variación estacional para el Eh (disminuye notablemente en verano).
Bajo jaulas de cultivo es el sur de Chile ³ .	-66,33 (Teliupta) -98,97 (Pto. Rosales) -100,00 (Pto. Rosales) -127,57 ((Pto. Rosales) -151,37 (Teliupta)		Todos los valores corresponden a sitios de cultivos activos de diferentes categorías. En todos los casos se determinaron Eh negativos, señal de que los sedimentos son reductores.

¹Carroll y col., 2003; ²Hermosilla y col., 2005; ³IFOP, 2006.

3.2.3. Criterios de Corte

En la Tabla 8 se describen los puntos críticos para el indicador Redox (expresados en mV), los cuales se establecieron en la siguiente distribución:

Tabla 8: Criterios de Corte para la Función de Calidad de Potencial Redox.

Potencial Redox (mV)	Función de Calidad (%)
100	100
50	80
0	50
-50	15
-100	1

Con esta distribución se logra diferenciar los sedimentos anaeróbicos de los aeróbicos y se establece el criterio de protección en los sedimentos hipóxicos, los que sin estar aún degradados, serían más fácilmente recuperables por buenas prácticas ambientales. Igualmente, el estado no admisible es aquel en que el sedimento hipóxico pasa a ser anóxico (sobre los -100 mV).

3.2.4. Función de Calidad

El ajuste matemático realizado a partir de los valores referenciales arrojó una función de la siguiente forma:

$$y = y_0 + \left(\frac{A}{W \times \sqrt{\frac{\pi}{2}}} \right) \times \exp \left(-2 \times \left(\frac{x - x_c}{W} \right)^2 \right)$$

Donde:

y_0	=	-5,90001
X_c	=	94,07962
W	=	163,28731
A	=	21689,8872
R^2	=	0,99935

Esta función se puede representar gráficamente como la mitad de una Gaussiana, la cual se dibuja según la Figura 6:

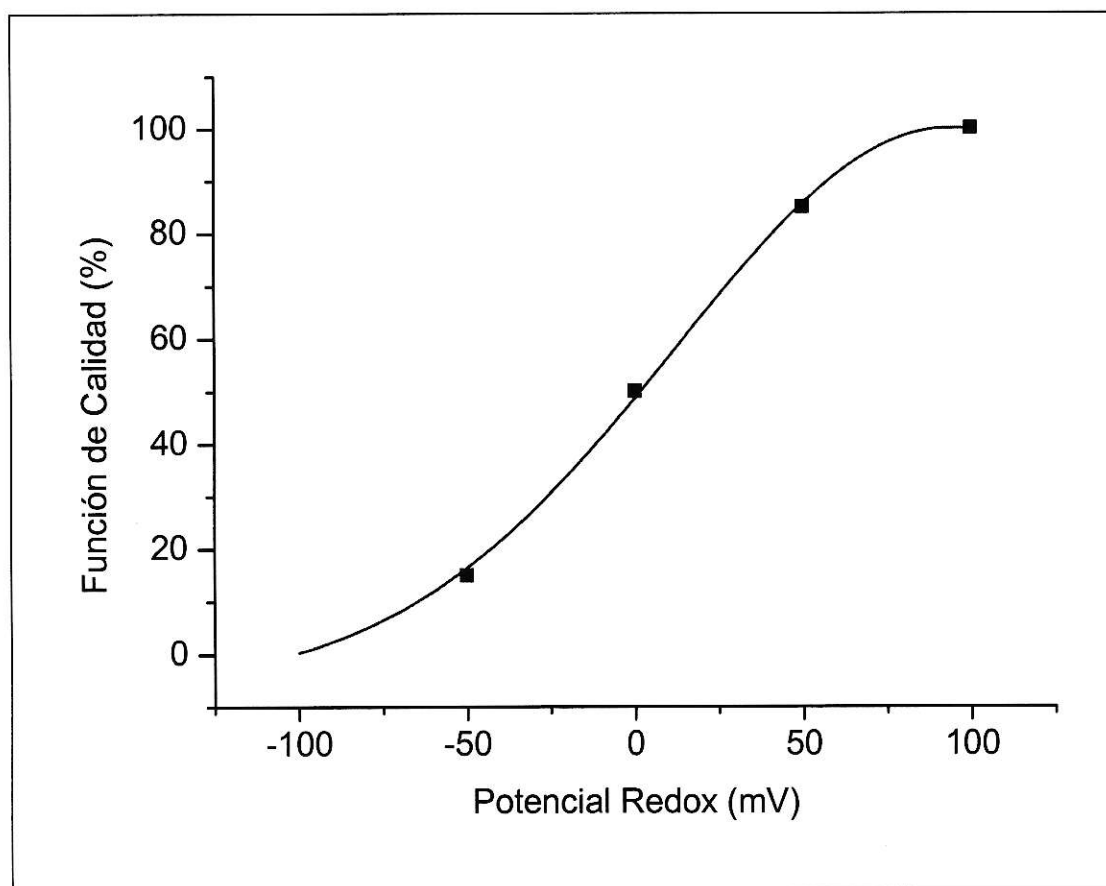


Figura 6: Curva de ajuste para la función de calidad del indicador Potencial Redox.

3.3. Antecedentes del Indicador pH.

3.3.1. Antecedentes Bibliográficos

El pH controla procesos químicos y biológicos de un sistema natural, al determinar el grado de acidez. En cuerpos de agua naturales, su valor varía entre 6 y 8,5 y se debe sobre todo al equilibrio carbónico (balance $\text{CO}_2/\text{CO}_3^{2-}/\text{HCO}_3^-$) y a la actividad vital de los microorganismos acuáticos. Respecto a lo primero, la secuencia de equilibrios de disolución de CO_2 en un agua y la subsiguiente disolución de carbonatos e insolubilización de bicarbonatos alteran drásticamente el pH. Asimismo, la actividad fotosintética reduce el contenido de CO_2 mientras que la respiración de los organismos heterótrofos produce dióxido de carbono causando un efecto contrario con respecto al pH del medio acuático.

El valor del pH puede variar por factores naturales como la acción de los procesos de fotosíntesis, o artificialmente por descargas industriales y urbanas. Estos cambios de pH serán determinantes en la calidad de las aguas, debido a que controlarán la liberación y retención de contaminantes en los sedimentos al influir en la especiación química.

En sistemas acuosos marinos, los valores de pH pueden fluctuar ampliamente durante el día, a través de procesos biológicos y químicos que se producen en estos sistemas. Por efecto del fitoplancton y debido al proceso de fotosíntesis efectuado por estos organismos, los valores de pH serán altos durante el día (ambiente levemente básico) y bajos durante la noche (ambiente levemente ácido) donde aumenta la respiración y se produce ácido carbónico.

Con relación a la contaminación por metales, la disponibilidad de metales será mayor en ambiente ácido y menor ante un aumento del valor de pH debido a que en

ambiente más básico se forman especies poco solubles, fuertes reacciones de adsorción y mayor estabilidad de complejos orgánicos (Golterman, 1983).

Por otro lado, el aporte de ácidos que naturalmente pueden acceder a un medio hídrico lo podría acidificar: así, por ejemplo el H₂S formado en aguas poco oxigenadas y con fuerte ambiente reductor, o los ácidos húmicos (ácidos débiles) provenientes de la mineralización de la materia orgánica. Tampoco debe olvidarse el fenómeno de la lluvia ácida. Efectos de alcalinización natural de un agua, de forma opuesta, pueden detectarse vía disolución de rocas y minerales de metales alcalinos y alcalinotérreos del terreno.

En lagos y embalses, el pH experimenta una evolución espacial y temporal ligada a la dinámica térmica y fisicoquímica del lago, de forma que esta variable disminuye a lo largo de la columna de agua. Además, durante la mezcla la variación es de apenas 0,1 a 0,15 unidades de pH desde la superficie al fondo; en cambio, durante la estratificación térmica, en las aguas superficiales ricas en fitoplancton (que metaboliza CO₂) se hallan valores de pH bastante más altos que en profundidad. En estas últimas zonas, pobres en oxígeno y con abundante microorganismos anaeróbios, los valores de pH son más bajos, del orden de 1,0 inferiores a los de las aguas de superficie.

3.3.2. Valores de Referencia y de Ajuste

A continuación se presentan valores de pH en la zona de estudio y en otras zonas expuestas a descargas producto de la actividad acuicultora (Tabla 9).

Tabla 9: Valores referenciales de pH en zonas de estudio.

Zona de Estudio	pH	Situación
Zona de canales entre Puerto Montt y Laguna San Rafael ¹	7,74 – 7,7	Valores extraídos del reporte de datos Crucero Cimar Fiordos I, el cuál monitorea tanto zonas influenciadas por cultivos como zonas sin intervención.
Golfo de Reloncaví al Golfo de Corcovado ²	7,4 – 7,7	Nuevamente se monitorea la química del agua de mar, evaluando pH en zonas con y sin influencia acuícola.
Zona bajo las jaulas en el sur de Chile ³	6,7 – 7,87	Se realiza la medición de pH en zonas influenciadas por jaulas de cultivos de distintas categorías. Se encuentran en condiciones levemente ácidas.
Zonas de cultivos en Noruega ⁴	7,49 – 7,72	Se encuentra una variación de pH a distintas profundidades de la columna de agua, encontrándose el fondo de los sitios de cultivos con una tendencia a la acidez del medio.

¹ Silva & Calvete, Crucero Cimar Fiordos I, 1996; ² Nelson Silva, Crucero Cimar Fiordos IV, 2000; ³ FIP, 2006; ⁴ Carroll y col, 2003.

3.3.3. Criterios de Corte

Para el caso del pH, los puntos críticos se establecieron de según la Tabla N° 10:

Tabla 10: Criterios de Corte para la Función de Calidad de pH.

pH	Función de Calidad (%)
7,25	100
7,5	95
6,75	90
8,0	50
6,5	43,75
6,0	10

3.3.4. Función de Calidad

Con estos puntos críticos, se delinea una función matemática con características similares a una curva gaussiana. La expresión matemática de esta función se entrega a continuación:

$$y = y_0 + \left(\frac{A}{w \times \sqrt{\frac{\pi}{2}}} \right) \times \text{Exp} \left(-2 \times \left(\frac{x - x_c}{w} \right)^2 \right)$$

Donde,	y_0	=	1,96329
	X_c	=	7,27732
	W	=	1,22832
	A	=	161,62424

La función se puede representar gráficamente como aparece en la Figura 7. En esta figura se describe una gaussiana donde la mejor condición del sedimento se encuentra en el intervalo cercano a pH 7.

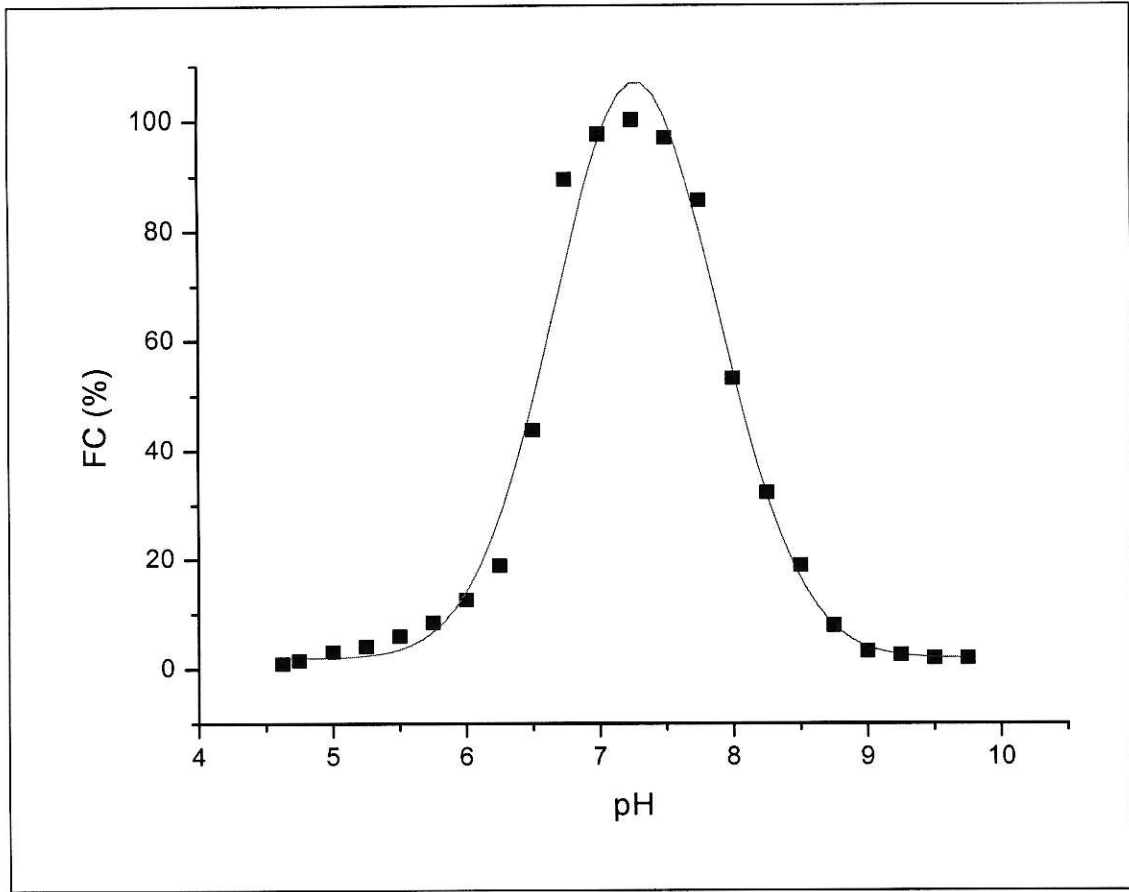


Figura 7: Curva de ajuste para la función de calidad de la variable pH.

3.4. Antecedentes del Indicador Oxígeno Disuelto (OD)

3.4.1. Antecedentes bibliográficos

El oxígeno es un requisito nutricional esencial para la mayoría de los organismos vivos, dada su dependencia del proceso de respiración aeróbica para la generación de energía y para la movilización de carbono en la célula. Además, el contenido de oxígeno disuelto (OD) es uno de los componentes de mayor importancia en un medio acuático ya que cumple un papel fundamental en la mantención de la productividad de los sistemas acuáticos y en el ciclaje de materias dentro del mismo. Además, se presenta como un buen indicador de posibles situaciones de contaminación debido a que presenta variaciones drásticas en sus concentraciones en cortos periodos de tiempo.

La entrada de oxígeno a la columna de agua envuelve dos procesos: la entrada de oxígeno atmosférico y la generación de oxígeno dentro del cuerpo de agua por la actividad de organismos fotosintéticos. Para el primer proceso es necesario un gradiente apropiado basado en las diferencias entre las presiones parciales de oxígeno en la atmósfera y en el agua. Por otro lado, el aporte de oxígeno al agua a través del proceso de fotosíntesis constituye la otra fuente primaria de oxígeno en el agua. El oxígeno derivado del proceso de fotosíntesis se produce como resultado de la fotólisis del agua:



Sin embargo, estos procesos de suministro están balanceados por procesos de oxidación-reducción del material orgánico y nitrogenado, respiración de fitoplancton, consumo de oxígeno por parte de otros organismos, descomposición de materia orgánica y la captación de los sedimentos.

La concentración de oxígeno disuelto en la interface agua-sedimento es particularmente importante debido a que controla el flujo de nutrientes, metales pesados y otros componentes desde los sedimentos hacia la columna de agua (ANZECC, 2000). De ahí la importancia de mantener sistemas con condiciones aeróbicas, tanto para la salud de los organismos acuáticos como para reducir la liberación de componentes tóxicos.

Si bien los niveles de OD necesarios para sostener la vida de organismos acuáticos varían de una especie a otra, se ha establecido la condición de hipoxia de un cuerpo de agua cuando la cantidad de oxígeno disuelto es menor a 2 mL/L (Wu, 2002). Este fenómeno puede ser natural, causado por una estratificación tal como la formación de Haloclinas y Termoclinas. Sin embargo, la hipoxia se debe a excesivas entradas de nutrientes antropogénicos y materia orgánica dentro de cuerpos de agua con pobre circulación.

La oxidación química de los sedimentos también provoca un consumo del oxígeno presente en el medio al ser utilizado como medio transportador de electrones (Sakouri, 2003). Los sedimentos anóxicos pueden causar un significativo desacople entre las relaciones de organismos pelágicos y bénticos, reflejándose severamente en las interacciones depredador-presa.

3.4.2. Valores de Referencia y de Ajuste

A continuación se presentan valores referenciales de contenido de oxígeno disuelto en la zona de estudio (Tabla 11).

Tabla 11: Valores referenciales de Oxígeno Disuelto (mL/L) en la zona de estudio.

Zona de Estudio	Oxígeno Disuelto (mL/L)	Situación
Bahía Bajo Molle, Iquique ¹	6,03 a 7,37 (Verano) 4,44 a 5,77 (Otoño) 5,13 a 7,25 (Invierno) 5,75 a 8,79 (Primavera)	Esta bahía se encuentra situada en una región costera sin mayores influencias antrópicas, por lo que las fluctuaciones en los valores de OD corresponden a cambios estacionales naturales que ocurren en el ecosistema, sin evidencias de signos de contaminación.
Canales Australes de Chile: entre Boca del Guafo y Golfo Elefantes ²	5,2 a 8,4 (en superficie) > 5,0 (a 50 m de Prof.) <4,0 (a 75 m de Prof.) 2,5 (a 150 m de Prof.)	La tendencia de la distribución de OD es que a nivel superficial se encuentran las mayores concentraciones, disminuyendo con la profundidad. Esta distribución se observa en toda el área de estudio y se mantiene durante todo el año. No se encontraron zonas anóxicas.
Zona Sur de Chile: entre Boca del Guafo y Fiordo de Aysén ³	5,9 a 8,2 (en superficie) > 5,0 (a 75 m de Prof.) 4,0 (a 125 m de Prof.) < 3,5 (cercano al fondo)	Se informaron valores estacionales en la zona de estudio. Se encuentran valores más bajos durante primavera (valores extraídos en la tabla). Se observaron buenos niveles de OD a nivel superficial. A mayores profundidades, la concentración de oxígeno disminuyó rápidamente. Se
Zona Golfo de Reloncaví y Golfo Corcovado ⁴	5,61 a 5,84 (Castro) 5,77 a 5,98 (Dalcahue) 5,18 a 5,38 (Chacao) 3,87 a 3,95 (Reloncaví) 3,60 a 3,96 (Comau) 4,65 a 5,29 (Riñihue)	Sitio altamente influenciado por actividades acuícolas. Se determinó que ninguno de los fiordos o canales presentan condiciones anóxicas. Estos autores sólo observan condiciones sub-óxicas (1,5-3,0 mL/L) en las zonas profundas de la mayoría de los canales y fiordos a lo largo del borde continental.

¹ Arias y col, 2001; ²Guzmán & Silva, 2002; ³Guzmán & Silva, 2006; ⁴Rudolph y col, 2007.

3.4.3. Criterios de Corte

En el caso del oxígeno disuelto, los valores iniciales se asignaron de acuerdo a lo expuesto en la Tabla 12:

Tabla 12: Criterios de Corte para la Función de Oxígeno Disuelto.

Oxígeno Disuelto (mL/L)	Función de Calidad (%)
6,6	100
5,0	80
4,0	50
1,0	1

3.4.4. Función de Calidad

El ajuste realizado arrojó una función de la forma:

$$y = y_0 + \left(\frac{A}{w \times \sqrt{\frac{\pi}{2}}} \right) \times \text{Exp} \left(-2 \times \left(\frac{x - x_c}{w} \right)^2 \right)$$

Donde,

y_0	=	-2,05134
x_c	=	6,35596
w	=	4,03882
A	=	520,36017

Finalmente, la gráfica de la función de calidad se dibuja como la mitad de una curva gaussiana. El comportamiento de este indicador es muy similar al del indicador Potencial Redox. La Figura se presenta a continuación (Figura 8).

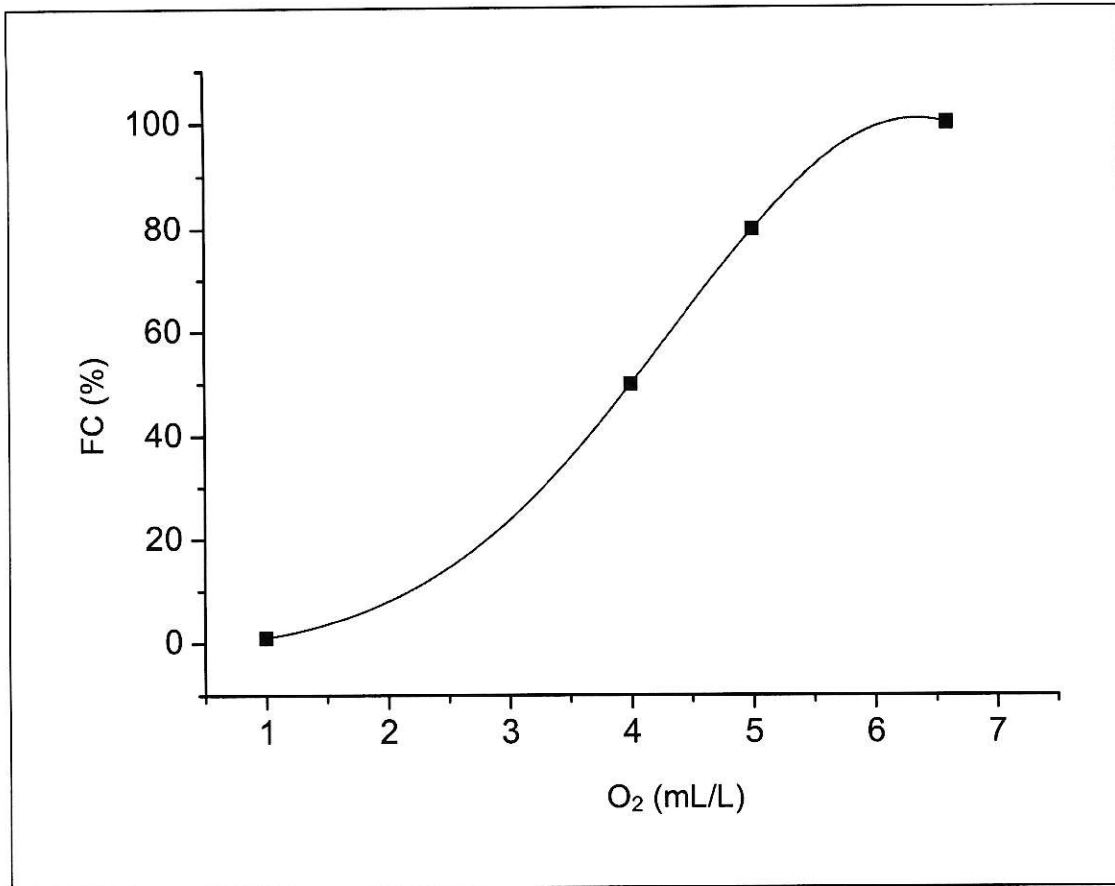


Figura 8: Curva de ajuste para la función de calidad de la variable Oxígeno Disuelto.

3.5. Ponderación y combinación de Indicadores.

Considerando las funciones matemáticas desarrolladas para cada indicador, es posible establecer una única expresión para el Índice de Condición de Fondo que abarca la sumatoria ponderada de las funciones de calidad:

$$ICF = (A \times f_{EH}) + (B \times f_{MO}) + (C \times f_{O_2}) + (D \times f_{pH})$$

Donde A, B, C y D representan los respectivos coeficientes de ponderación para cada indicador. Por su parte se denota como f_x a las correspondientes funciones de calidad para cada indicador y las expresiones Eh, MO, O₂ y pH corresponden a potencial redox, materia orgánica, oxígeno disuelto y pH respectivamente.

El índice de condición de fondo es una expresión cualitativa global del estado del sitio de cultivo. Representa el estado de condición ambiental del fondo, a través de la combinación de los efectos ambientales a que se encuentran sometidos los centros de cultivo. Es decir, expresa la resultante de los efectos combinados para conformar una calidad ambiental del fondo (buena, regular, mala) con vistas a tomar las medidas correspondientes para mantener y/o recuperar la condición buena.

En su expresión, el ICF es una sumatoria ponderada de las funciones de condición ambiental para los parámetros ambientales considerados. Se considera como sumatoria porque el entorno bajo los centros recibe impactos diversos cuyos efectos se adicionan en un mismo lugar y ponderada porque todos los efectos no tienen el mismo significado ambiental: unos desencadenan o magnifican los otros. Finalmente, con esta herramienta se pueden expresar mediciones experimentales en

escalas diferentes en una escala única y comparable, de condición ambiental. Estas funciones forman el nexo de una medición (cantidad) con una condición cualitativa.

Debido a que los sitios de cultivo acuícolas están clasificados en distintas categorías según criterios de profundidad, producción y tipo de cultivo, es necesario confeccionar un ICF específico para cada una de estas categorías. Esta confección está basada en que no todos los indicadores se presentan en todas las categorías, por lo cual, el ICF variará de una a otra.

3.5.1. Principios generales para distribuir las ponderaciones.

Resulta imprescindible en la confección del índice, entender la interacción entre las variables ambientales, asignándoles distintas ponderaciones de acuerdo a los efectos o cambios que producen en el medio ambiente.

Para asignar las ponderaciones de importancia para cada indicador fue necesario establecer algunos principios básicos, los cuales serán a continuación señalados:

- En primer lugar, la suma de las importancias debe ser igual a 1, independiente del número de indicadores a considerar.
- La ponderación debe reflejar el significado ambiental de cada uno de los procesos vinculados con el indicador que se mide.

En el presente trabajo, para el caso de los centros de cultivo, la existencia de cantidades significativas de materia orgánica estimula su deposición en los sedimentos y su posterior degradación por los microorganismos. Sin embargo, cuando hay grandes cantidades de materia orgánica, el fenómeno natural de la degradación consume el oxígeno del medio, liberando compuestos reducidos como metano y sulfuro de hidrógeno, produciéndose la anoxia de los sedimentos.

De tal manera que la anoxia del sedimento sería el fenómeno más crítico y como es medida o estimada a partir del potencial redox, se le asignará a este parámetro la mayor ponderación. Directamente vinculado a lo anterior tenemos la Materia orgánica, pues es la existencia y degradación de ésta la que facilita los fenómenos que conducen a sedimentos anóxicos. El resto de los parámetros se ordenan a continuación en la Figura N° 9, otorgando mayor importancia para el oxígeno disuelto y en último lugar el pH del sedimento. A este último (pH) se le asigna una importancia baja considerando que una modificación medible del pH sucede sólo en condiciones extremas.

Estas ponderaciones serán utilizadas durante la validación del ICF para la categoría 3 debido a que esta categoría es la única que contempla los cuatro indicadores ambientales.

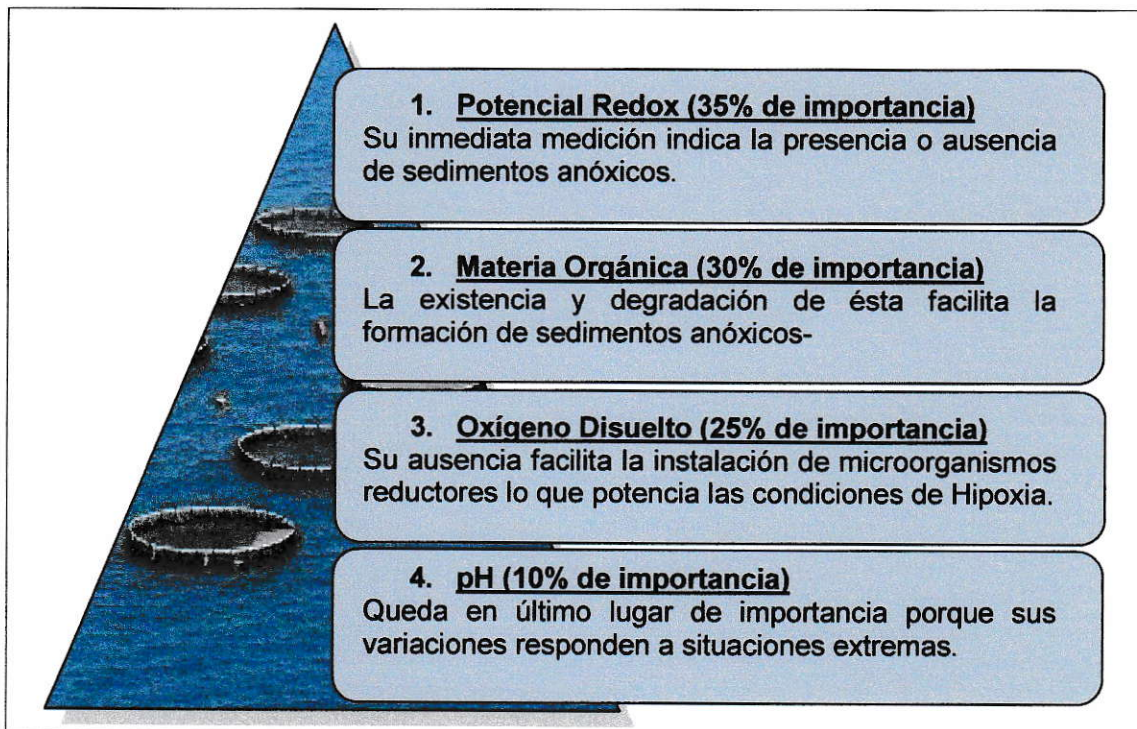


Figura 9: Escala de importancia para los indicadores ambientales seleccionados.

Una vez entregadas las ponderaciones, es posible plantear cada uno de los Índices por categorías y realizar las validaciones del método a través de la información perteneciente a Sernapesca.

3.6. Validación del Índice de Condición de Fondo por categorías.

Una vez construido el ICF debe ser validado con datos reales con la finalidad de evaluar en qué condiciones se encuentran los distintos sitios de cultivo y hacer la comparación entre la evaluación de Sernapesca y la evaluación que se propone en este trabajo, aplicando el ICF.

Hasta ahora, la evaluación realizada por Sernapesca corresponde a una supervisión de tipo copulativo, es decir, se supervisa cada uno de los parámetros de forma individual, omitiendo la relación que existe entre unos y otros.

La validación contiene información ambiental recopilada entre los años 2004 a 2006, proporcionada por los titulares de los centros de cultivo a través de los informes ambientales (INFA), analizados por la Subsecretaría de Pesca y las acciones de fiscalización desarrolladas por el Servicio Nacional de Pesca.

Para facilitar la interpretación de los resultados de validación, éstos serán organizados siguiendo la clasificación de los centros de cultivos de conformidad al sistema de producción, magnitud de la operación y características del ambiente en que se emplaza el centro, esto es, tipo de sustrato y batimetría. En la Tabla 13 se resume el universo de datos de distintos centros de cultivos a nivel nacional, utilizados para la validación por año y categoría.

Tabla 13: Universo de registros de centros de cultivos por año, utilizados en la validación de resultados.

Categoría	2004	2005	2006
Categoría 1	370	145	405
Categoría 2	145	34	176
Categoría 3	534	77	393
Categoría 4	---	---	---
Categoría 5	227	19	114
TOTAL	1276	275	1088

A continuación se presentan los resultados obtenidos al evaluar los datos experimentales según las distintas alternativas para la formulación del Índice de Calidad de Sedimentos anteriormente descritas.

3.6.1. CATEGORIA 1

Pertencen a esta categoría aquellos sitios de cultivo con sistemas de producción extensivos de fondo, es decir, aquellos sistemas de producción cuya alimentación en etapa de engorda se realiza en forma natural o con una escasa intervención antrópica. Además, se consideran aquellos centros con sistema de producción extensivo suspendidos, cuyas producciones máximas proyectadas sean iguales o inferiores a 300 toneladas por año y que se encuentren sobre fondos blandos iguales o inferiores de 60 metros. Predominan en esta categoría los cultivos de mitílidos (choritos), ostréidos (ostras y ostiones) y pectínidos (almejas).

Debido a las características de esta categoría de sitios y en concordancia a lo dispuesto en el reglamento RAMA, el indicador a considerar será solamente el de Materia Orgánica, constituyéndose la siguiente expresión para el ICF:

$$ICF = (A \times f_{MO}) = 1$$

Asignándole una ponderación completa al único indicador presente en la expresión. Los resultados validados se indican a continuación separados por años.

3.6.1.1. Año 2004

De los 370 centros de cultivos registrados durante este año bajo la clasificación de categoría 1, sólo fue posible evaluar 313 centros que cumplieran con toda la información necesaria para llevar a cabo la validación.

De la evaluación realizada de acuerdo a los parámetros de Sernapesca se obtuvo que sólo un 1% de los centros se encuentra en mala calidad ambiental, predominando aquellos centros en condiciones aeróbicas (305 centros calificados en condición buena). También se encontraron 4 centros sin evaluación asignada por Sernapesca (Ver Figura 10).

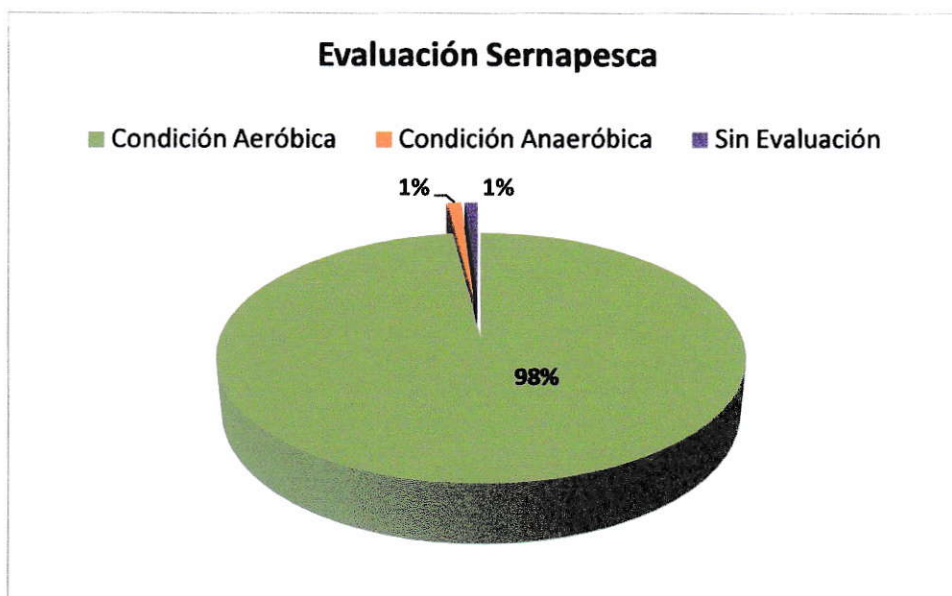


Figura 10: Evaluación realizada por Sernapesca de la calidad de sedimentos para sitios de cultivos pertenecientes a la Categoría 1 durante el año 2004.

Al someter la misma información al análisis con el ICF propuesto, se obtuvo una mayor distribución en las condiciones ambientales: 75% (237 centros) se encontrarían en condiciones aeróbicas, pero un importante porcentaje se encuentra en malas condiciones ambientales (16% lo que corresponde a 49 centros).

De acuerdo con esta evaluación, aparece una tercera condición ambiental, la cual se denominó como Condición Intermedia. Para la categoría 1 del año 2004 se encontraron 9% de los centros en dicha condición, lo cual se puede interpretar como potenciales candidatos a sufrir algún tipo de empeoramiento en la calidad de sus fondos. Los resultados quedan expuestos en la Figura 11.

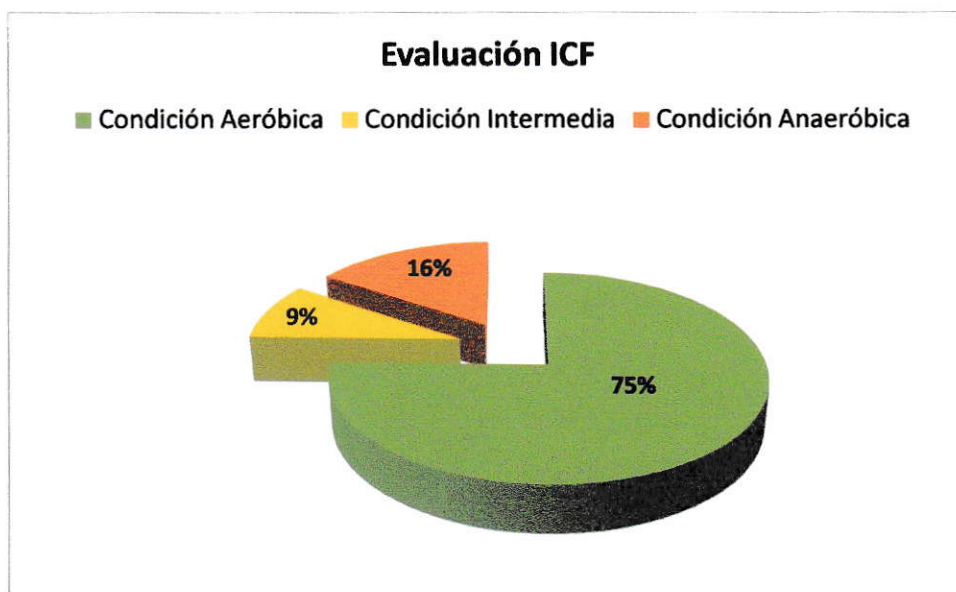


Figura 11: Evaluación a través del ICF para sitios de cultivos pertenecientes a la Categoría 1 durante el año 2004.

3.6.1.2. Año 2005

De los 145 centros pertenecientes a esta categoría y año, se encontraron sólo 72 centros con toda la información disponible para efectuar la validación. En la evaluación entregada por Sernapesca nuevamente se observa un predominio de centros en condición aeróbica (89%) y también se incluye un 8% en centros sin evaluación, esto debido a que dichos centros se encontraban con objeciones en sus INFAs. Finalmente, se encontró que sólo un 3% (correspondiente a 2 centros) no contaban con condiciones aeróbicas en sus fondos (mala calidad de sedimento). Los resultados se muestran en la Figura 12.

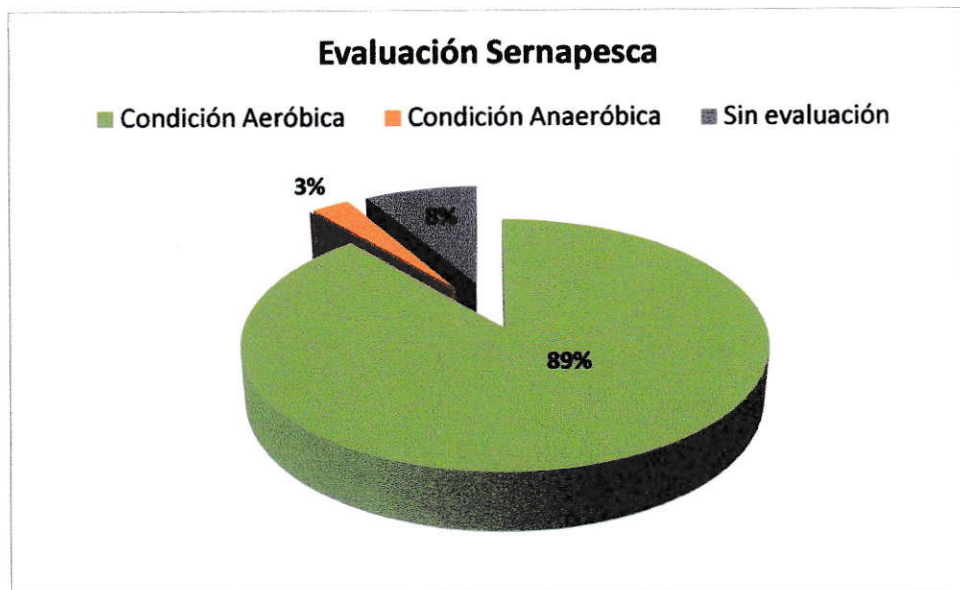


Figura 12: Evaluación comparativa de la calidad del sedimento en sitios de cultivos Categoría 1 pertenecientes al año 2005.

Utilizando la misma información de los centro para la evaluación del ICF se observan resultados diametralmente opuestos, se observa que más del 50% de los centros presentan buenas condiciones de fondo (42 centros), pero un 31% se encuentran en malas condiciones (22 centros en condición de anoxia en sus sedimentos). Nuevamente aparecen centros en condición intermedia, los cuales suman el 11%. (Ver Figura 13)

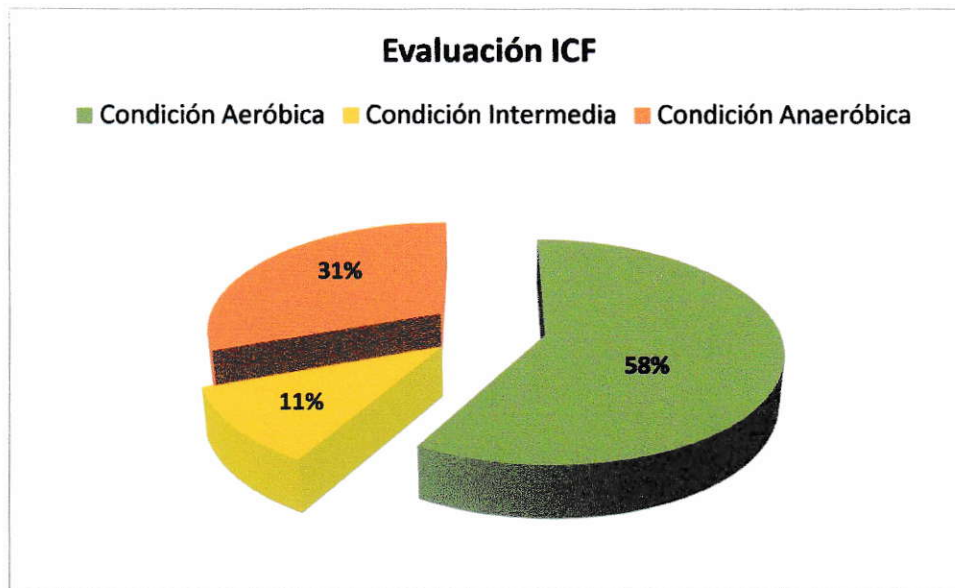


Figura 13: Evaluación de la calidad del sedimento en sitios de cultivos Categoría 1 pertenecientes al año 2005 usando el ICF.

3.6.1.3. Año 2006

Para este año no fue posible considerar la evaluación de Sernapesca debido a que no figuraba disponible en la base de datos utilizada. Por lo anterior, sólo es posible realizar la evaluación con el ICF.

De los 405 centros de cultivos considerados se objetaron dos de ellos por no contar con el total de la información requerida.

Los resultados demostraron que el 72% de los centros presenta condiciones aeróbicas (291 centros), 13% se encuentra en condición intermedia (50 centros) y un 15% presenta malas condiciones de fondo (61 centros). Dichos resultados se muestran en la Figura 14:

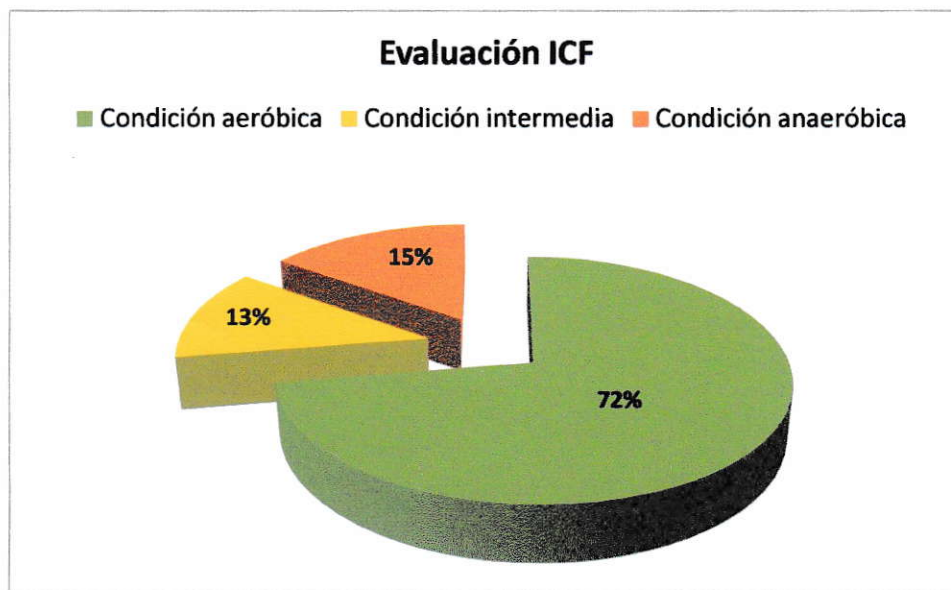


Figura 14: Evaluación del ICF para sitios de cultivos Categoría 1 evaluados durante el año 2006.

Si se efectúa un seguimiento a aquellos centros que presentan información ambiental durante los tres años consecutivos, se observará que de un total de 215 centros con continuidad en los registros de Sernapesca, 119 mantuvieron su calidad en los sedimentos (55,3%); 39 de ellos (18,1%) aumentaron su calidad durante este periodo y finalmente 57 centros bajaron considerablemente su calidad de fondo

(26,5%). Aquellos centros que empeoraron su calidad de sedimento se ordenan en la tabla 14, en la cual se puede evidenciar que en algunos casos, los cambios en la calidad de los sedimentos son abismantes.

Tabla 14: Centros de cultivos pertenecientes a la Categoría 1 que disminuyen su calidad de fondo durante el periodo 2004-2006.

Nº Centro	ICF 2004	ICF 2006	Nº Centro	ICF 2004	ICF 2006
102702	14,32	4,68	101802	48,91	37,98
102701	34,04	26,48	102351	100	90,74
102820	7,35	3,09	102583	100	51,93
102733	36,83	12,41	101949	100	54,64
102700	32,54	3,68	102607	100	43,94
102753	37,33	15,19	102420	100	87,66
102746	100	18,02	102232	81,15	69,65
102821	37,63	3,68	102835	100	89,28
102792	23,78	16,20	102953	100	88,51
102919	100	41,64	102839	100	92,19
102120	94,53	87,42	102465	78,00	64,21
102732	100	77,61	100339	79,00	25,65
102826	48,21	30,80	102338	100	78,05
102363	100	93,97	101943	100	78,72
102704	61,00	8,42	102301	100	92,01
102546	100	76,50	102081	100	93,26
102295	100	85,93	30045	100	67,00
101141	12,64	7,77	30076	100	95,64
100269	44,56	16,78	102603	52,00	3,09
102156	94,50	88,10	100304	100	37,41
22001	85,39	75,63	102915	100	36,62
102000	100	89,74	100316	100	88,78
102211	100	70,54	102215	24,71	10,33
102282	18,44	11,45	102162	67,00	38,58
102343	44,63	37,09	100160	91,39	77,08
102138	100	71,94	101608	18,26	1,00
101972	100	89,00	102108	100	72,84
40088	100	31,84	100677	100	51,12
102598	99,52	28,01			

En esta tabla se observa que la calidad del sedimento va empeorando con el paso del tiempo. Así en los casos más extremos, la variación de la calidad del fondo disminuyó desde la condición buena a la mala directamente, sin siquiera pasar por la situación intermedia, lo que refleja drásticos cambios en cortos periodos. Si bien esta tendencia no se cumple para la mayoría de los sitios comparables, en el análisis comparativo realizado, el porcentaje de aquellos que bajan su calidad es considerable, por lo tanto, justifica su estudio y mayor un detalle en su discusión.

3.6.2. Categoría 2

Pertencen a esta categoría aquellos centros de cultivo con sistemas de producción extensivo suspendidos cuyas producciones máximas proyectadas estén entre 301 y 750 toneladas por año y que se encuentren sobre fondos blandos iguales o inferiores de 60 metros. También corresponden a esta categoría los centros de cultivo con sistemas de producción intensivo, cuyas producciones máximas proyectadas sean iguales o inferiores a 50 toneladas por año y que se encuentren sobre fondos blandos iguales o inferiores de 60 metros. Nuevamente predominan en esta categoría cultivos de mitílidos, pectínidos y aparecen también macroalgas y abalones.

Esta categoría presenta condiciones ambientales muy similares a la categoría tipo 1 por lo cual la configuración del índice no presenta ningún cambio. Nuevamente se consideró sólo el indicador de Materia Orgánica, por lo que el ICF quedó determinado como sigue:

$$ICF = (A \times f_{MO}) = 1$$

Con este índice, la validación de los datos de esta categoría se presenta a continuación.

3.6.2.1. Año 2004

De los 145 centros registrados en esta categoría, se evaluaron 136 registros. Del total sometido a evaluación por Sernapesca ese año, 132 (96%) de ellos se encontraban en condiciones aeróbicas compatibles con la actividad que se desarrolla en sus aguas. También se estimó que 2 centros (2%) presentaban condiciones anaeróbicas y por lo tanto no cumplían con los mínimos establecidos. En la Figura 15 es posible observar de forma gráfica la evaluación planteada por Sernapesca para esta categoría:

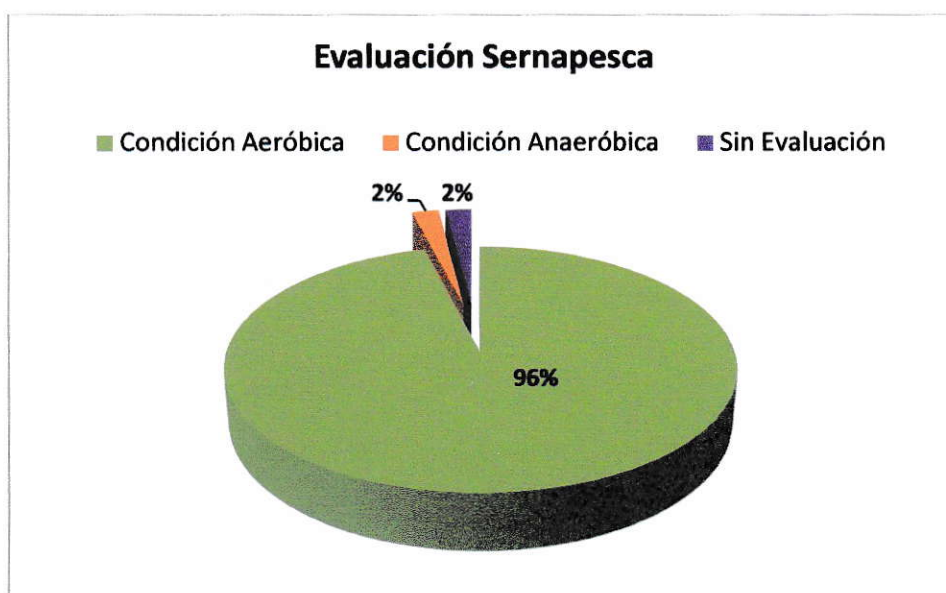


Figura 15: Evaluación de Sernapesca para sitios de cultivos pertenecientes a la Categoría 2 durante el año 2004.

Al realizar la evaluación utilizando el ICF se determinó que sólo 119 (87,5%) centros estaban en condiciones aeróbicas y que 7 sitios (5,1%) presentaban condiciones intermedias, esto quiere decir, que se encontraban en riesgo de empeorar su calidad. Finalmente se encontraron 10 centros en malas condiciones ambientales (bajo el 50% de calidad). La Figura 16 recopila de forma gráfica el estado de los sedimentos para esta categoría y año:

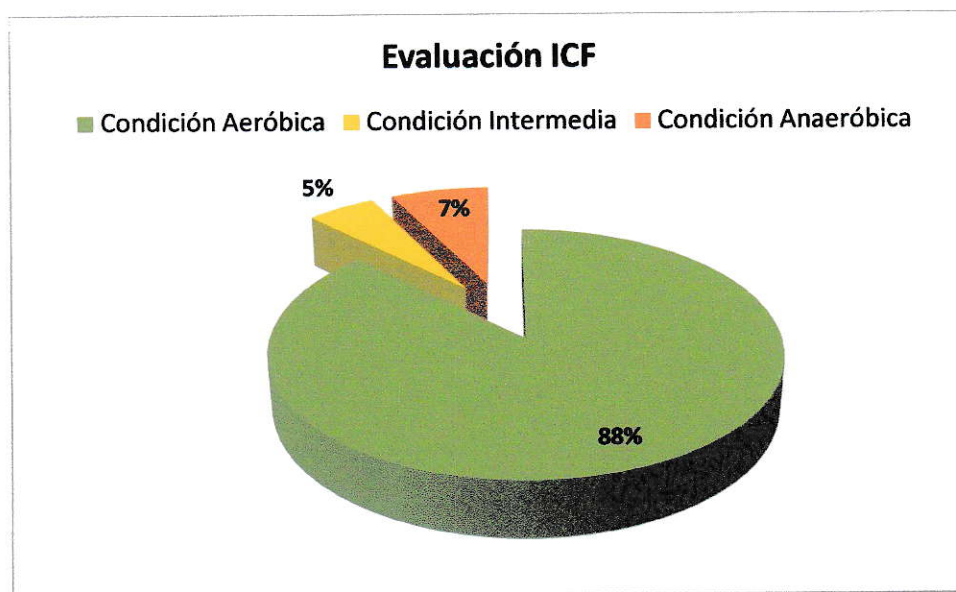


Figura 16: Evaluación comparativa de la calidad de sedimentos usando el ICF para sitios de cultivos Categoría 2 pertenecientes al año 2004.

3.6.2.2. Año 2005

Si bien el total de datos a evaluar disminuye considerablemente en relación a otros años y categorías, igualmente serán validados a través del ICF. Durante este año sólo se registraron los INFAS de 34 centros de cultivos, de los cuales 31 de ellos contaban con toda la información requerida.

Del total de centros evaluados por Sernapesca durante ese año, se encontró que 90 % de éstos presentan condiciones aeróbicas (28 centros) y el 10% restante se encuentra sin evaluación por falta de información (Ver Figura 17).



Figura 17: Evaluación de Sernapesca para sitios de cultivos Categoría 2 pertenecientes al año 2005.

La evaluación a través del ICF mejora el porcentaje de sitios compatibles con la actividad a un 94% y el porcentaje restante se distribuye entre centros en condición intermedia y centros no aptos para el desarrollo de la actividad (3% para cada uno de las condiciones). La Figura 18 muestra la distribución de los centros considerados.

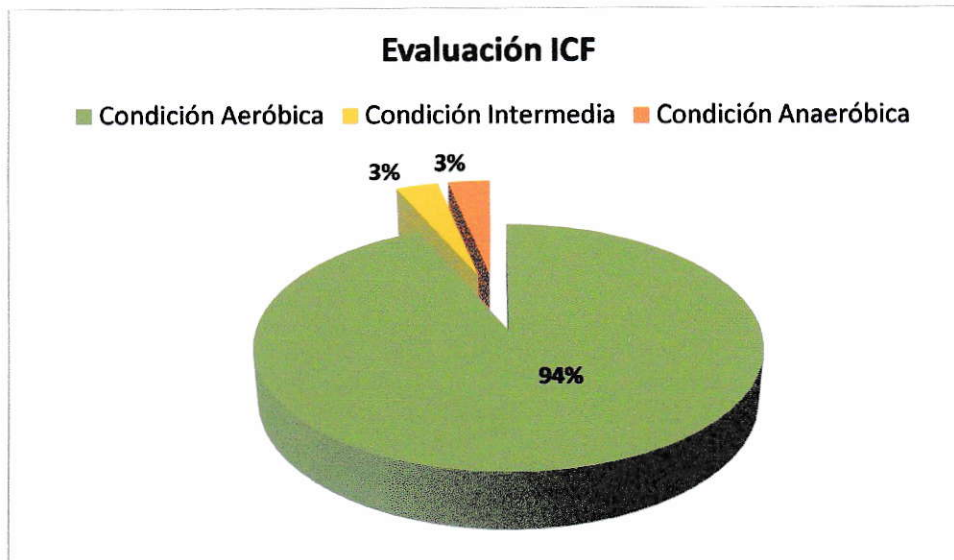


Figura 18: Evaluación comparativa de la calidad de los sitios de cultivo a través de la evaluación del ICF para Categoría 2 pertenecientes al año 2005.

3.6.2.3. Año 2006

Se trabajará con un total de 176 centros de cultivos, de los cuales 145 se encuentran en condiciones aeróbicas compatibles (correspondientes al 82%); 21 de ellos en condiciones intermedias (12%) y 10 en condiciones deplorables ambientalmente (6%).

Nuevamente no es posible comparar con la evaluación realizada por Sernapesca ya que no se encontraba disponible para ninguna categoría durante el año 2006. La Figura 19 muestra los resultados mencionados anteriormente:

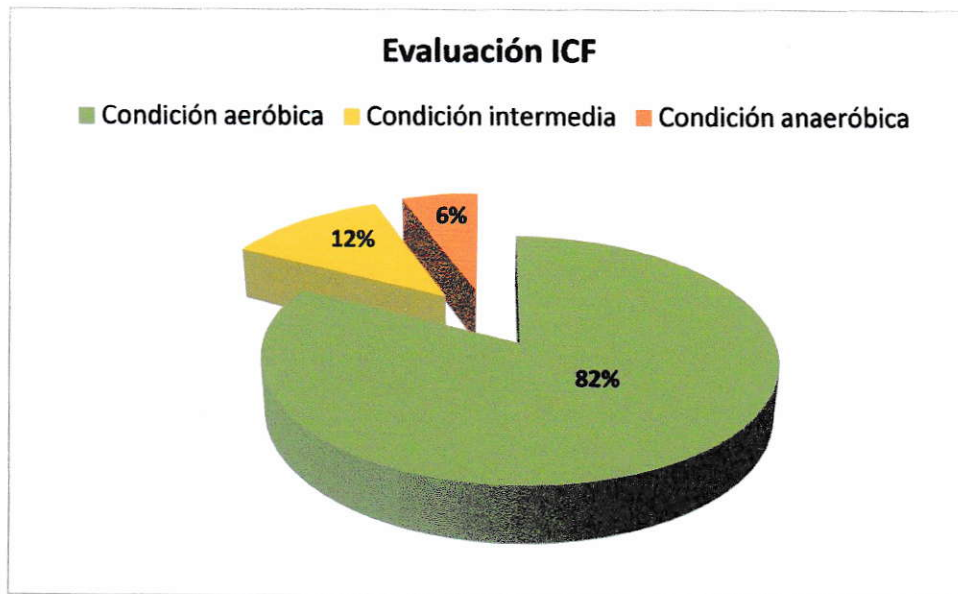


Figura 19: Evaluación comparativa de la calidad de sedimentos para sitios de cultivos Categoría 2 pertenecientes al año 2006.

Nuevamente se determinó la variación de calidad durante el periodo 2004-2006 y los resultados demuestran que es posible realizar un seguimiento de la calidad de los sedimentos a 79 centros de cultivos. De estos 79 centros, se observó que 52 de ellos mantuvieron su calidad de sedimento (66%); 11 centros mejoraron su calidad (14%) y finalmente 16 centros disminuyeron su calidad de fondo. El detalle de aquellos centros que disminuyeron su calidad se observa en la Tabla 15.

Tabla 15: Centros de cultivos pertenecientes a la Categoría 2 que disminuyen su calidad de fondo durante el periodo 2004-2006.

Nº Centro	ICF 2004	ICF 2006	Nº Centro	ICF 2004	ICF 2006
101969	100	69,69	100044	100	96,00
102350	100	93,94	102157	86,16	21,49
102093	87,93	0,95	102809	100	94,96
102231	100	78,39	102330	42,46	22,20
102381	100	65,15	102361	100	86,71
40033	100	81,76	102416	100	86,62
102107	100	68,81	102206	100	63,41
102172	82,97	73,89	101776	100	37,05

Particular atención reciben los centros 102093, 102157 y 101776 debido a que sufrieron una variación desde condiciones óptimas de calidad del fondo a malas condiciones de sitio, sin alcanzar el estado intermedio de calidad sólo en el transcurso de dos años, lo que indicaría un empeoramiento acelerado de su calidad ambiental.

3.6.3. CATEGORIA 3

Es la categoría más común en la clasificación de centros de cultivo debido a que contempla todos aquellos centros de cultivo ubicados en cuerpos de agua terrestres, cualquiera sea su sistema de producción y sus producciones máximas proyectadas y que se encuentren sobre fondos blandos iguales o inferiores de 60 metros.

También se incluyen en esta categoría aquellos centros de cultivo con sistemas de producción extensivo suspendidos, cuyas producciones máximas proyectadas sean superiores a 750 toneladas por año y estén ubicados en sitios con profundidades iguales o inferiores a 60 metros.

Finalmente, se incluyen además los centros de cultivos con sistemas de producción intensivos, cuyas producciones máximas proyectadas sean superiores a 50 toneladas por año y que se encuentren sobre fondos blandos y a menos de 60 metros de profundidad.

En esta categoría se clasifican todos los cultivos salmonídeos, los cuales involucran la descarga directa de alimento a las aguas y una constante sobreexplotación, convirtiéndose en la clasificación de mayor fragilidad desde el punto de vista ambiental. Por lo mismo, la construcción del índice contemplará los cuatro indicadores antes expuestos, los cuales en conjunto describirán la calidad del sedimento. En este caso en particular se asignarán distintas ponderaciones para cada indicador:

- 35% para el indicador Potencial Redox.
- 30% para el indicador Materia Orgánica.
- 25% para el indicador Oxígeno Disuelto.
- 10% para el indicador pH.

Con las ponderaciones anteriores se completa un 100% de importancia. La distribución del índice toma entonces la siguiente forma:

$$ICF = (0,35 \times f_{Eh}) + (0,30 \times f_{MO}) + (0,25 \times f_{OD}) + (0,10 \times f_{pH}) = 1$$

Los resultados a las validaciones se presentan a continuación:

3.6.3.1. Año 2004

Durante este año se registraron 534 INFAs, de los cuales 228 no contaban con la mínima información para realizar la validación. De un total de 306 centros con

información de evaluación por Sernapesca, 273 de ellos (89%) se encontraban en condiciones aeróbicas y por lo tanto sin problemas de contaminación. Sólo se detectan 30 casos de anoxia a través de esta metodología (9,8%) y 3 centros no pudieron ser evaluados (0,98%). Los resultados se observan en la Figura 20:

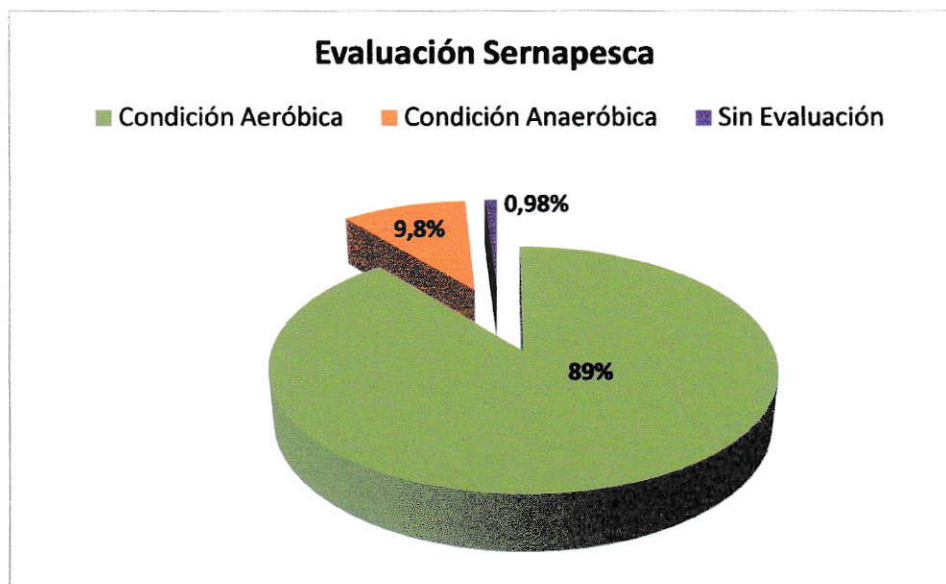


Figura 20: Evaluación comparativa de la calidad de sedimentos para sitios de cultivos Categoría 3 pertenecientes al año 2004.

Al aplicar la metodología del ICF, los resultados cambian drásticamente. Se encuentra que 167 sitios se encuentran con características habilitantes (55%) y 110 de los centros se presentan en condiciones intermedias (36%), esto significa que estos centros poseen altas posibilidades de empeorar su condición. Finalmente, 29 de los centros (9%) presentaron malas condiciones ambientales. La Figura 21 muestra dichos resultados:

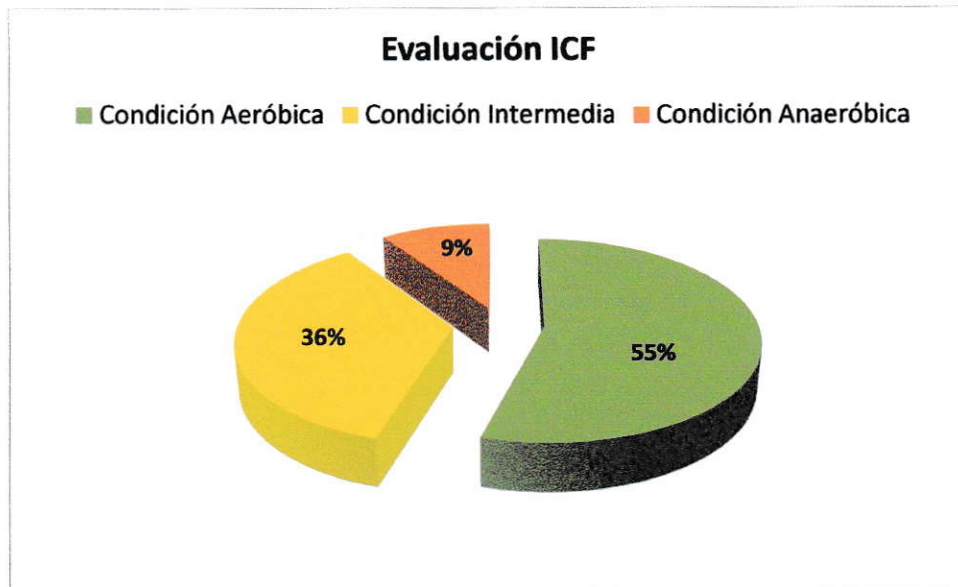


Figura 21: Evaluación comparativa a través del ICF de la calidad de sedimentos para sitios de cultivos Categoría 3 pertenecientes al año 2004.

3.6.3.2. Año 2005

Los registros para este año presentan una gran cantidad de centros con carencia y objeciones de datos en sus INFAS. De los 77 centros registrados, sólo es posible validar 18 centros que presentan toda la información requerida.

De estos 18 centros, se encontró que 16 de ellos presentan buenas condiciones en sus sedimentos (89%) y que sólo 2 centros no fueron evaluados por objeciones en sus antecedentes (Ver Figura 22).

La evaluación a través del ICF demostró que del total de centros validados, un 56% presentaban buena calidad de sus sedimentos y el 44% restante se encontraba en una situación intermedia de calidad. No se encontraron situaciones de anoxia en este año, tal como se demuestra en la Figura 23.

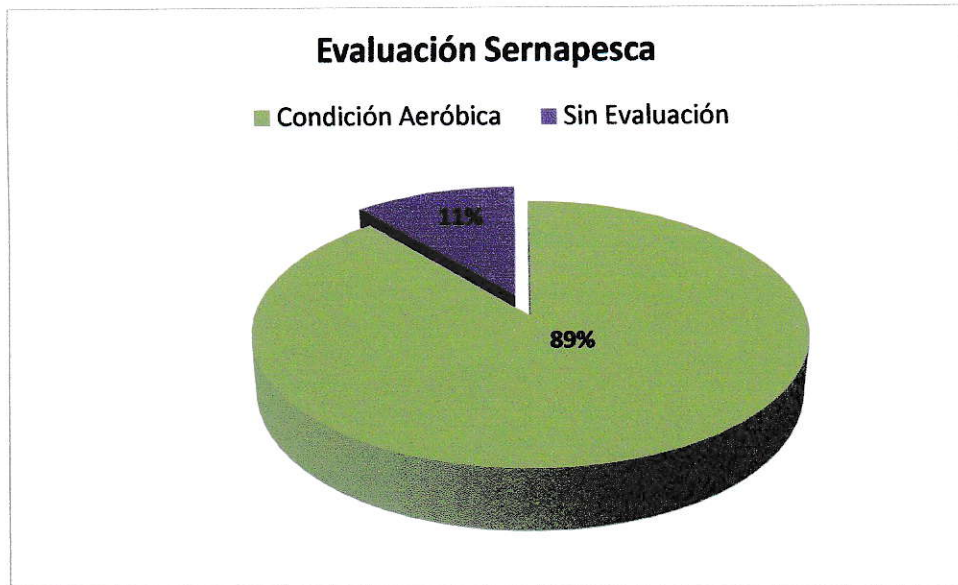


Figura 22: Evaluación de Sernapesca de la calidad de sedimentos para sitios de cultivos Categoría 3 pertenecientes al año 2005.

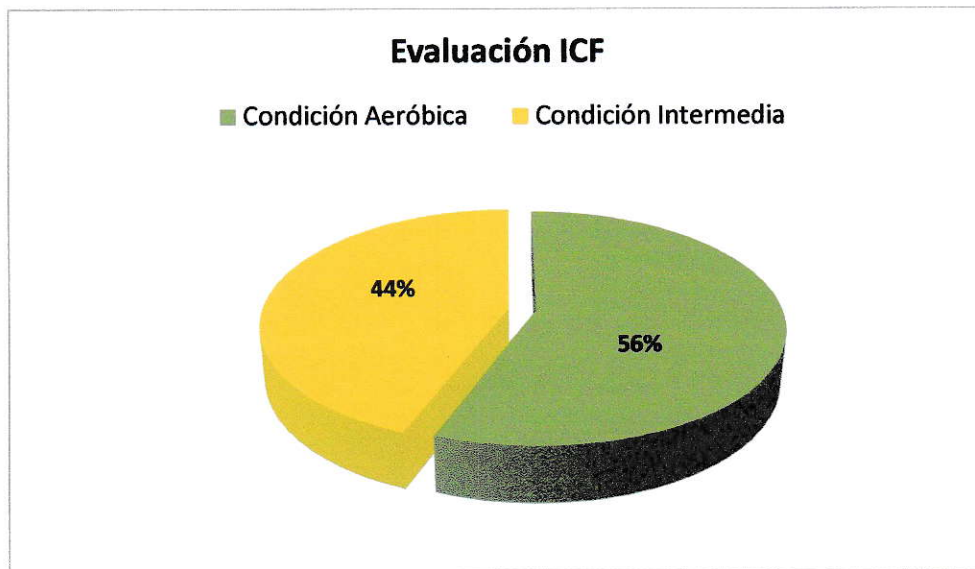


Figura 23: Evaluación a través del ICF de la calidad de sedimentos para sitios de cultivos Categoría 3 pertenecientes al año 2005.

3.6.3.3. Año 2006

De los 393 centros que entregaron su Información Ambiental durante este año, sólo 56 de ellos contaban con toda la información requerida. En la mayoría de los casos incompletos la información faltante correspondía al indicador oxígeno disuelto.

De los 56 centros utilizados en la validación del ICF, 40 sitios de cultivo presentaron buena calidad en sus fondos, 14 centros clasificaron en la condición intermedia y sólo 2 centros alcanzaron mala condición ambiental (ver Figura 24).

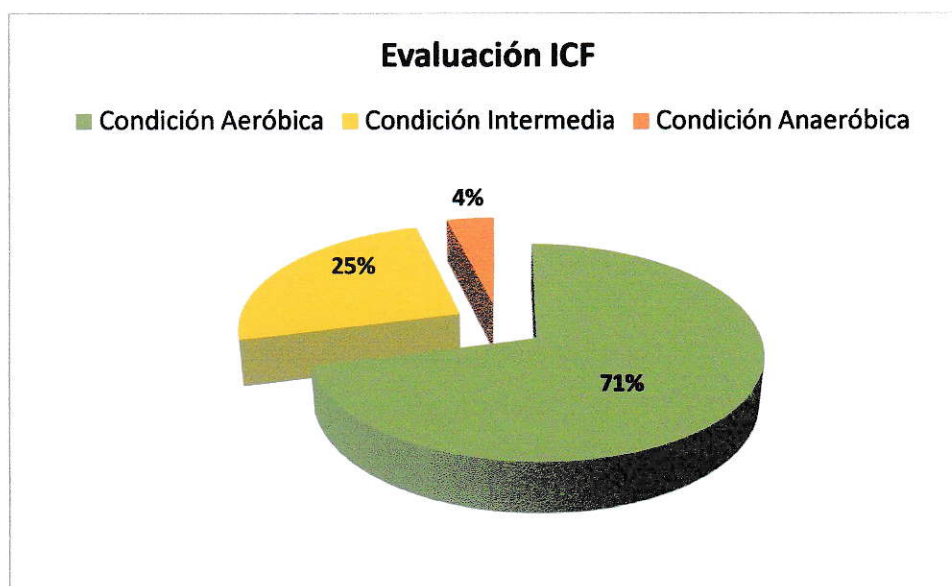


Figura 24: Evaluación del ICF para calidad de sedimentos en sitios de cultivos Categoría 3 pertenecientes al año 2006.

No se pudo comparar con la evaluación realizada por Sernapesca este año, debido a que no se disponía de la información necesaria.

Esta categoría resulta ser la más importante ya que reúne a todos los cultivos salmonídeos del país y por lo tanto representa un importantísimo porcentaje de la actividad industrial. Es por esta misma razón que se intentó también realizar el seguimiento a aquellos centros que presentaban información consecutiva de sus condiciones ambientales, pero resultó que la gran mayoría de los centros registrados durante el 2004 ya no estaban en funcionamiento durante el 2006, o por lo menos, no presentaban la información correspondiente.

Del total de centros que permitieron realizar el seguimiento (sólo 38 centros), se encontró que sólo uno de ellos mantuvo su calidad de sedimentos; 18 de ellos disminuyó su calidad y 19 mejoró sus condiciones de fondo.

Debido a la gran cantidad de centros que poseían una única evaluación durante los tres años de estudio, resulta imposible describir una tendencia o inferir un comportamiento para esta categoría.

3.6.4. CATEGORIA 4

Corresponden a esta categoría los centros de cultivo con sistemas de producción intensivo que se encuentren en sectores de fondos duros o semiduros y cuyas profundidades sean iguales o inferiores a 60 metros.

Debido a que esta clasificación contempla cultivos en zonas cuyos fondos están compuestos principalmente por material consolidado, sólido, ausente de partículas que exhiban movimiento como roca, cantos rocosos y basamientos volcánicos; se estima que la interacción de este con agentes contaminantes como la materia orgánica es mínimo y por lo tanto no amerita su fiscalización a través del muestreo de ninguno de los indicadores elegidos para la elaboración de este índice.

3.6.5. CATEGORIA 5

En esta categoría se encuentran los centros que, independiente del sistema de producción y de las producciones máximas proyectadas, se encuentren en sectores con profundidades superiores a 60 metros. Predominan en esta categoría los centros de cultivos de salmones y en menor cantidad centros de mitílidos.

Debido a las características de esta categoría de sitios y en concordancia a lo dispuesto en el reglamento RAMA, el indicador a considerar será solamente el de Oxígeno Disuelto, constituyéndose la siguiente expresión para el ICF:

$$ICF = (A \times f_{OD}) = 1$$

Asignándole una ponderación completa al único indicador presente en la expresión.

Los resultados validados se indican a continuación separados por años.

3.6.5.1. Año 2004

Del total de datos revisados, sólo se consideraron 159 informes ambientales, de los cuales 53 se encontraban sin evaluación por parte de Sernapesca debido a objeciones en la información entregada. También se consideraron 103 sitios de cultivo en buenas condiciones de fondo y sólo 3 de ellos con mala calidad de sedimento. La Figura 25 refleja la distribución para esta categoría.

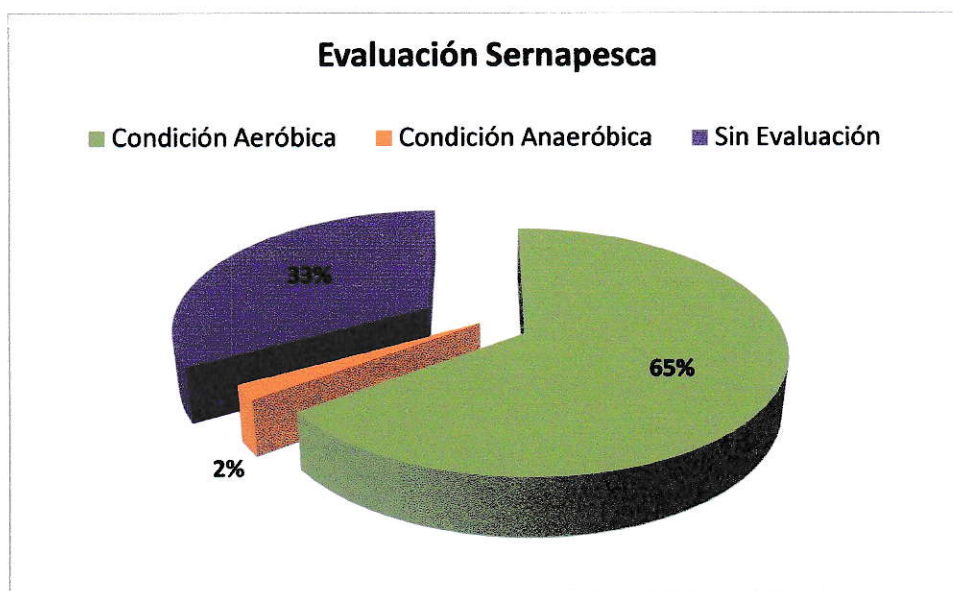


Figura 25: Evaluación entregada por Sernapesca para sitios de cultivo Categoría 5 pertenecientes al año 2004.

La validación con el ICF entrega distintos resultados. Los sitios con buena calidad de fondo alcanzan los 73 centros, además se encontraron 33 centros en

condiciones intermedias y finalmente 53 centros con malas condiciones ambientales (ver Figura 26).

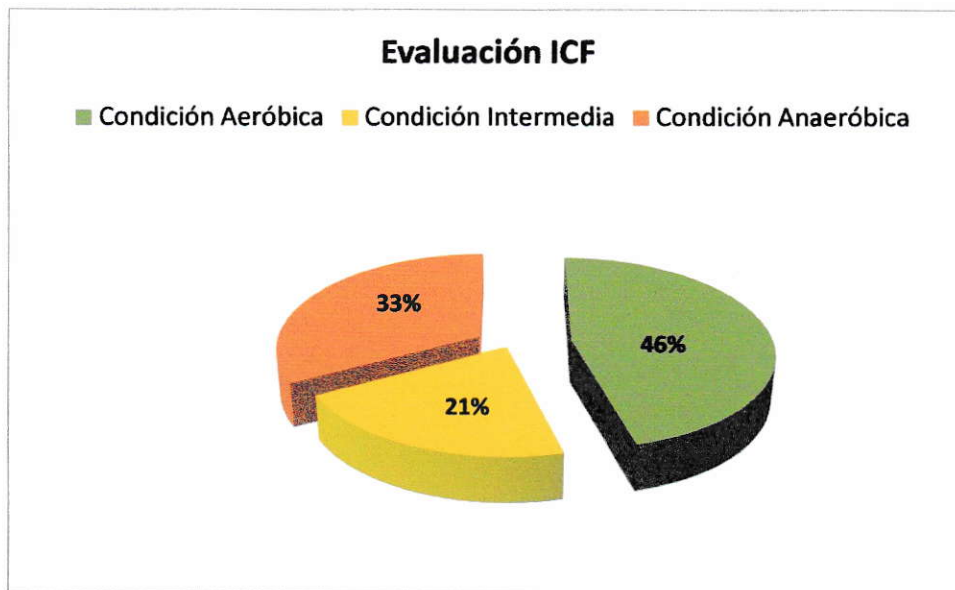


Figura 26: Evaluación entregada a través del ICF para sitios de cultivo Categoría 5 pertenecientes al año 2004.

3.6.5.2. Año 2005

Los centros correspondientes a esta categoría durante el 2005 que entregaron su información ambiental sólo suman 19, de los cuales 8 pudieron ser considerados en la validación. De estos 8 centros de cultivo, 3 presentaban buenas condiciones y 5 se encuentran sin evaluación por objeción de sus antecedentes.

La validación con el ICF demuestra que 4 centros presentan condiciones óptimas, 2 sitios en condición intermedia y 2 centros en malas condiciones ambientales. En las Figuras 27 y 28 se puede observar lo antes descrito:



Figura 27: Evaluación entregada por Sernapesca para sitios de cultivo Categoría 5 pertenecientes al año 2005.

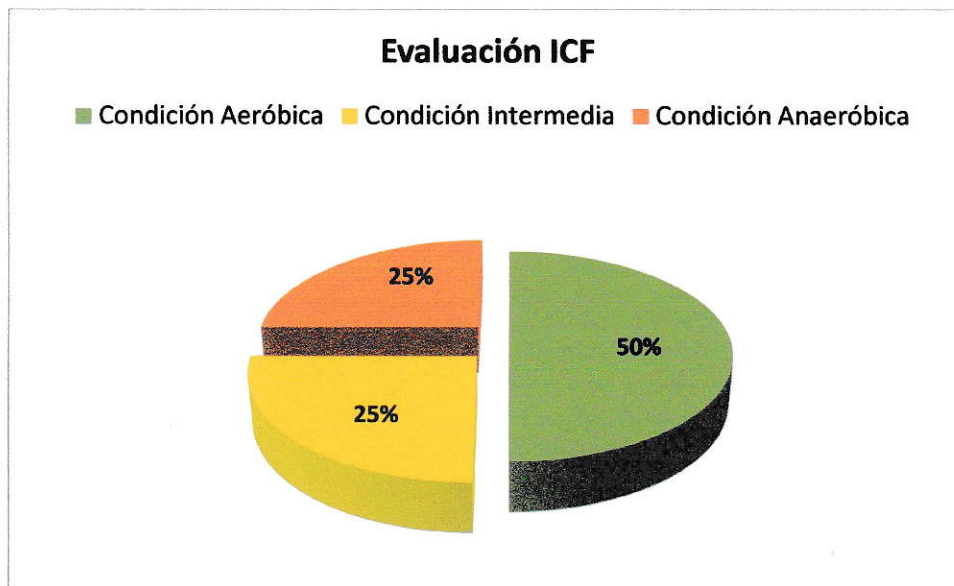


Figura 28: Evaluación entregada a través del ICF para sitios de cultivo Categoría 5 pertenecientes al año 2005.

3.6.5.3. Año 2006

Del total de centros con la información ambiental requerida, se encontró que 23 sitios de cultivo presentaban buenas condiciones ambientales, 31 centros presentaban una calidad intermedia y la mayoría (53 centros) calificaba en condiciones deplorables para efectuar la actividad. Los resultados se muestran en la Figura 29:

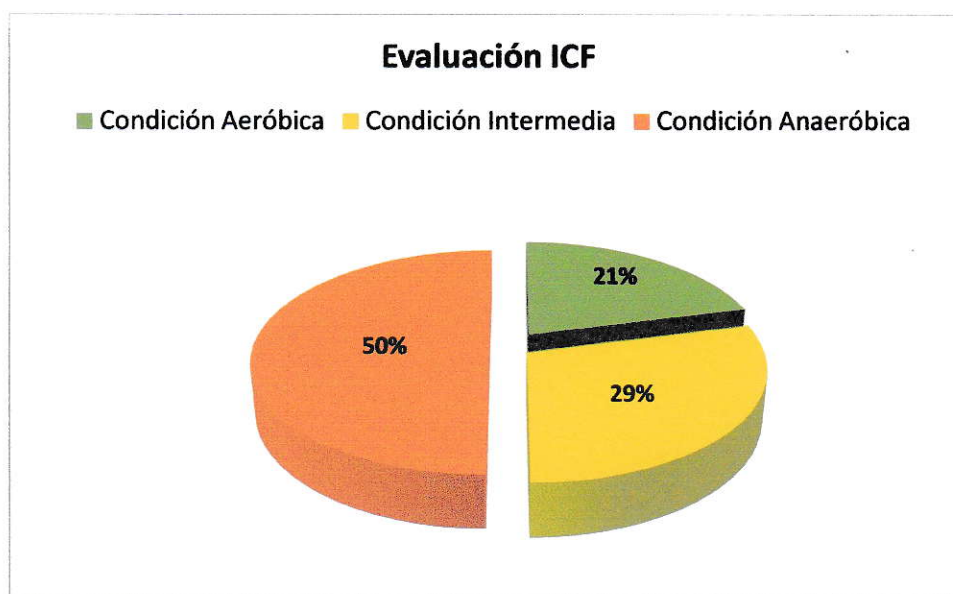


Figura 29: Evaluación entregada a través del ICF para sitios de cultivo Categoría 5 pertenecientes al año 2006.

Al igual que en todas las categorías evaluadas para el año 2006, no es posible considerar la evaluación realizada por Sernapesca.

Se observó además que durante el seguimiento a los centros con información ambiental consecutiva durante 2004-2006 existe una gran variación de la calidad de sus fondos. De 57 centros comparables, solo 5 mantuvieron su calidad (9%); 25 de ellos aumentaron su calidad (25%) y un gran porcentaje (38 centros que corresponden

al 67%) disminuyó su condición de fondo, alcanzando la mayoría de estos la condición de mala calidad. El detalle de aquellos centros que empeoraron su calidad de sedimento se observa en la Tabla 16.

Tabla 16: Centros de cultivos pertenecientes a la Categoría 5 que disminuyen su calidad de fondo durante el periodo 2004-2006.

Nº Centro	ICF 2004	ICF 2006	Nº Centro	ICF 2004	ICF 2006
120071	100	85,21	100446	20,67	11,22
110453	92,31	24,87	100445	49,70	8,53
100678	100	50,00	100447	41,24	13,78
110448	84,21	61,33	101003	81,35	56,40
110343	100	87,61	102017	54,56	28,26
100679	93,16	60,41	100450	46,28	37,64
110209	63,80	54,86	100448	43,37	34,19
101326	33,68	8,20	101293	24,00	10,32
110204	64,72	45,55	101551	54,56	37,64
102121	52,27	17,91	101283	44,53	7,99
101862	99,16	44,96	110251	93,25	62,26
110246	47,76	28,97	101926	63,64	44,38
101942	19,76	6,86	102013	99,86	74,35
110186	63,34	33,16	110202	87,61	7,99
110193	10,96	6,96	110279	100	50,00
101680	99,93	10,83	100991	63,80	21,92
110229	93,79	43,52	110259	87,61	57,94
110260	93,79	53,64	110261	100	55,78
110295	71,40	66,56	110226	93,79	57,94

3.7. Aplicabilidad práctica del Índice de Condición de Fondo.

El índice de condición de fondo en su origen viene a complementar la forma en que tanto el Servicio Nacional de Pesca, como la Subsecretaría de Pesca han evaluado ambientalmente el desempeño del sector acuícola.

Se elaboró además una planilla de trabajo, que permite el ingreso de datos por parámetros y facilita la labor de cálculo del ICF para el personal de SERNAPESCA a cargo de las evaluaciones de los Informes Ambientales. Esta herramienta entrega los promedios, el cálculo de función para cada indicador y el cálculo final del ICF de manera automática una vez ingresado los datos de los parámetros.

3.8. Discusión General.

En términos generales, los resultados de este trabajo indican que, tal como se había previsto, las condiciones de calidad de los fondos acuícolas son heterogéneas.

La importancia operativa de estos resultados indican que se ha construido un importante instrumento para la definición de la calidad ambiental en los distintos centros de explotación acuícola, con la cual se puede establecer y diferenciar el estado ambiental en el que se encuentran.

Esto quiere decir, que la persona que debe tomar una decisión al respecto, tiene una herramienta cuantitativa importante que le permite diferenciar que factores ambientales son más relevantes en cada uno de las categorías y dirigir su gestión e inversión allí donde genere el mayor impacto.

También el ICF es una importante herramienta para definir el estado o línea base de la situación ambiental de cada uno de los centros, con fines de establecer mecanismos de seguimiento, control y evaluación del estado ambiental.

Técnicamente, aquí se ha estimado el índice de calidad ambiental como una “variable latente” que ha demandado la construcción de un sistema de indicadores ambientales coherente y conceptualmente consistente con lo que se ha intentado representar: una medida cuantitativa del valor relativo de las condiciones ambientales de los sitios de cultivo acuícolas.

Finalmente, el ICF es un poderoso instrumento de gestión que permitirá resumir una gran cantidad de datos en un sólo índice que resume sintéticamente la mayor parte de la información contenida en las variables que determinan la calidad ambiental en los sedimentos y la escala de análisis que se desarrolló en esta investigación.

A modo de recomendación, se debería considerar la medición de Eh para todas las categorías de cultivos, ya que de todos los indicadores ambientales considerados es el primero en orden de importancia ya que es capaz de indicar una disminución de la calidad ambiental ligada directamente a la condición de anoxia. Además, su medición e interpretación no requiere de mayores costos de análisis, lo que lo convierte en una útil medición preventiva.

IV. CONCLUSIONES

Las conclusiones de este trabajo se señalan a continuación:

- Se formularon funciones correspondientes a la calidad ambiental de sitios acuícolas para los indicadores Materia Orgánica, Potencial Redox, pH y Oxígeno Disuelto, considerando distintos valores de referencia nacionales e internacionales.
- Se establecieron las condiciones de contorno que permitieron desarrollar expresiones ponderadas para el Índice de Condición de Fondo con las cuales se estimó la condición de anoxia en centros de cultivos pertenecientes a todas las categorías descritas en la normativa chilena.
- Se logró la estimación de dos condiciones extremas: una condición mala, en donde se asume situación de anoxia; y una condición buena, en la cual se encuentran condiciones oxidantes y presencia de oxígeno en el fondo. Por otro lado, también cada función define una condición intermedia, la cual permite tomar las medidas adecuadas para revertir el empeoramiento de la calidad y llevar el valor del ICF nuevamente a buenas condiciones ambientales.
- Se compararon los efectos ambientales de la utilización del ICF propuesto versus la evaluación actual desarrollada por Sernapesca. De esta forma los

resultados obtenidos de la aplicación del instrumento muestran para todas las categorías diferencias en la calidad de las zonas de cultivos, disminuyendo los centros en buenas condiciones y aumentando aquellos en condiciones intermedias y malas. Esto infiere una mayor rigurosidad en la etapa evaluativa y por lo tanto dicho instrumento plantea una mejor alternativa de fiscalización.

- Con respecto a la Hipótesis planteada, el ICF se presenta como una herramienta de gestión, que permite visualizar una condición determinada del estado de sedimentos provenientes de zonas de cultivos de peces en un momento dado, y además entregar una visión a mediano plazo de cómo puede evolucionar en su condición un área de sedimentación, estableciendo la escala donde se encuentra y las opciones de mejora o deterioro que pueda presentar, es decir, entrega una visión mucho más preventiva a como se evalúa actualmente este sector productivo.
- Finalmente, esta herramienta permite a la vez, establecer las medidas adecuadas de manera anticipada para evitar condiciones críticas de deterioro y mantener aquellas prácticas que han conducido a un determinado centro a operar manteniendo condiciones ambientales óptimas tanto para el entorno como para su propio beneficio.

V. PROYECCIONES

Debido a que el Índice de Condición de Fondo desarrollado en este trabajo corresponde a una primera herramienta de evaluación de la calidad de los sedimentos, es posible desarrollar una serie de proyecciones de este trabajo abarcando distintos tópicos como la investigación, la fiscalización y el desarrollo industrial. Algunas de estas proyecciones se exponen a continuación:

Investigación:

- Es posible llevar a cabo una revisión de las técnicas analíticas empleadas en la determinación de los distintos indicadores (pH, potencial redox, materia orgánica y oxígeno disuelto). Las técnicas empleadas en la actualidad sólo permiten realizar una medición general de cada parámetro pero no entregan un conocimiento más acabado de las interacciones que podrían desencadenarse entre cada indicador y la matriz que lo contiene o interacciones ocurridas entre parámetros.
- También es posible realizar investigaciones de la propia matriz sedimentaria ya que no se conocen muchos antecedentes de la dinámica de la matriz y sus sistemas de asimilación de contaminantes (formación de complejos, biodisponibilidad, etc.).
- Investigación de mecanismos oxido-reducción en circunstancias aeróbicas/anaeróbicas. Reconocimiento de agentes oxidantes y reductores que participan en los procesos.

Fiscalización:

- Revisión de la clasificación de centros de cultivos por categorías y la viabilidad de incluir otros indicadores en la información ambiental obligatoria.
- Utilización del Índice de Condición de Fondo como herramienta de fiscalización y de pronóstico. Es posible utilizar los valores entregados por el ICF como información de pronóstico similar al sistema de ventana móvil empleado en el sistema de pronóstico de la calidad de aire. (Índice de calidad de aire).
- Incorporar al sistema de fiscalización las coordenadas de latitud y longitud como parte importante del registro oficial. De este modo se puede realizar una verificación de que la información entregada corresponda al mismo sitio o en su defecto a su entorno cercano con la finalidad de hacer comparable la información con el paso del tiempo.

Aplicación:

- Utilización del ICF como herramienta de autocontrol por parte de los mismos centros de cultivos.

VI. REFERENCIAS

ANAM. Indicadores Ambientales de la República de Panamá. Documento de la Organización Ejecutiva para la elaboración de Indicadores Ambientales en Panamá. Año 2006.

BORJA, A. Los impactos ambientales de la acuicultura y la sostenibilidad de esta actividad. Boletín Instituto Español Oceanográfico **18** (1-4): 41-49, 2002.

BUSCHMANN ALEJANDRO. 2001. Impacto ambiental de la acuicultura. El estado de la investigación en Chile y el mundo. Terram Publicaciones, Santiago. 63p.

BUSCHMANN A., FORTT A. 2005. Efectos ambientales de la Acuicultura intensiva y alternativas para un desarrollo sustentable. Revista Ambiente y Desarrollo **21** (3): 58-64.

CANCEMI G., DE FALCO G., PERGENT G. 2003. Effects of organic matter input from on a fish farming facility on a *Posidonia oceanica* meadow. Estuarine, Coastal and Shelf Science **56**: 961-968.

CARROLL M., COCHRANE S., FIELER R., VELVIN R. y WHITE R. 2003. Organic enrichment of sediments from salmon farming in Norway: environmental factors, management practices, and monitoring techniques. Aquaculture **226**: 165-180.

CASTILLO REYES MARCELA 2009. Desarrollo de un Índice de contaminación metálica de sedimentos marinos. Seminario de Título. Universidad de Chile.

ESCOBAR LUIS. 2006. Indicadores sintéticos de calidad ambiental: un modelo general para grandes zonas urbanas. Revista Eure **32** (96) 73-98.

FAO. Estado Mundial de la Acuicultura 2006. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, 2007. 134 p.

FOLKE C., KAUTSKY N., BERG H., JANSSON A y TROELL M. 1998. The ecological footprint concept for sustainable seafood production: a review. Ecological Applications **8**(1) Supplement: S63-S71.

GUZMÁN D. y SILVA N. 2002. Caracterización física y química y masas de agua en los canales australes de Chile entre Boca del Guafo y Golfo Elefantes (Crucero Cimar Fiordo 4). Revista Ciencia y Tecnología del Mar **25** (2):45-76.

GUZMÁN D. y SILVA N. 2006. Condiciones oceanográficas físicas y químicas, entre Boca del Guafo y Fiordo Aysén (Crucero Cimar Fiordo 7). Revista Ciencia y Tecnología del Mar **29** (1):25-44.

HERMOSILLA Z., JORGE C., ROMERO I., MARTÍ E. Y CABAÑERO M. 2005. Diferencias espaciales y estacionales en el contenido de nutrientes, demanda de oxígeno y potencial redox en sedimentos bajo una instalación de producción acuícola en jaulas. Boletín Instituto Español Oceanográfico. **21** (1-4): 29-35.

INFORME PAÍS. Estado del Medio Ambiente en Chile 2005. Institutos de Asuntos Públicos Universidad de Chile. 371 p.

KARAKASSIS I., TSAPAKIS M., HATZIYANNI E., PAPADOPOULOU K. y PLAITI W. 2000. Impact of cage farming of fish on the seabed in three Mediterranean coastal areas. ICES Journal of Marine Science **57**: 1462-1471.

KEMPF M., MERCERON M., CADOUR G., JEANNERET H., MEAR Y. y MIRAMAND P. 2002. Environmental impact of a salmonid farm on a well flushed marine site: II. Biosedimentology. Journal of Applied Ichthyology **18**: 51-60.

MARÍN GALVÍN RAFAEL. 2003. Físicoquímica y Microbiología de los medios acuáticos: Tratamiento y control de calidad de aguas. Madrid, Ediciones Díaz de Santos. 311p.

MARÍN GUIRAO L., CESAR A., MARÍN A. y VITA R. 2005. Assessment of sediment metal contamination in the Mar Menor coastal lagoon (SE Spain): metal distribution, toxicity, bioaccumulation and benthic community structure. Revista Ciencias Marinas **31** (2): 413-428.

MAZZOLA A., MIRTO S., LA ROSA T., FABIANO M., DANOVARO R. 2000. Fish-farming effects on benthic community structure in coastal sediments. Analysis of meiofaunal recovery. ICES Journal of Marine Science **57**: 1454-1461.

OCDE, 1993. OCDE core set of indicators for environmental performance reviews. Organization for economic co-operation and development. Environment monographs N° 83.

OCEANA. Uso y abuso de antibióticos en la salmonicultura. Documento 23 de Enero de 2007. 14p.

PNUMA. 2001. Informe sobre los Indicadores Ambientales y de la Sustentabilidad en América Latina y el Caribe, XIII Reunión del Foro de Ministros de Medio Ambiente de América Latina y el Caribe. Río de Janeiro, Brasil.

RÍOS L., MACÍAS J. y ZIRINO A. 2003. Iridio: una opción para medir el potencial redox. Revistas Ciencias Marinas **29**(4): 509-520.

RUDOLPH A., AGUIRRE G., MOSCOSO J., SILVA N. y AHUMADA R. 2007. Ecotoxicological quality in sediments of Reloncaví and Corcovado gulfs, Chile. Investigaciones Marinas **35**(2): 53-61.

SAMAMÉ PAMELA. 2002. Propuesta de parámetros para la Norma de Calidad de Sedimentos. Seminario de Título Universidad de Chile.

SERNAPESCA. Cifras preliminares de desembarques, cosechas, agentes pesqueros y de acuicultura año 2008 [en línea] Valparaíso, Chile. <http://www.sernapesca.cl/> [consulta: 22 octubre 2009].

SHAKOURI M. 2003. Impact of cage culture on sediment chemistry a case of study in Mjoifjordur. Final Project. The United Nation University. Fisheries training programme. Fisheries Co. Of Iran (SHILAT). 44p.

SILVA N., VIDTS V., SEPÚLVEDA J. 2001. Materia Orgánica, C y N, su distribución y estequiometría, en sedimentos superficiales de la región central de los fiordos y canales australes de Chile (Crucero Cimar-Fiordo 2). Revista Ciencia y Tecnología Marina **24**: 23-40.

SOTO D., NORAMBUENA F. Evaluation of salmon farming effects on marine systems in the inner seas of southern Chile: a large-scale mensurative experiment. Journal Appl. Ichthyol. **20** (2004), 493-501.

VITA R., MARÍN A., MADRID J. A., JIMÉNEZ-BRINQUIS, CÉSAR A Y MARÍN-GIRAO L. 2002. Impacto ambiental de la acuicultura en el bentos marino: experimentos de exclusión-inclusión. Boletín Instituto Español Oceanográfico **18** (1-4) 75-86.

VII. ANEXOS

ANEXO 1: GLOSARIO DE TERMINOS SEGÚN NORMATIVA VIGENTE

Acuicultura: actividad que tiene por objeto la producción de recursos hidrobiológicos organizada por el hombre.

Área de sedimentación: fondo o zona directamente bajo los módulos de cultivo.

Caracterización Preliminar de Sitio (CPS): determinación de los parámetros y variables físicas, biológicas y químicas del área en que se pretende desarrollar acuicultura.

Centro de Cultivo: lugar e infraestructura donde se realizan actividades de acuicultura.

Condiciones aeróbicas: condición que indica la presencia de oxígeno disuelto en el agua intersticial de los primeros 3 cm del sedimento.

Condiciones anaeróbicas: condición que indica la ausencia de oxígeno disuelto en el agua intersticial de los primeros 3 cm el sedimento.

Fondo blando: lecho subacuático cubierto por material granular no cohesionado, poroso, cuyas partículas exhiben relación de movimiento entre sí, como conchuelas, gravas, arenas y fangos.

Fondo duro: lecho subacuático compuesto por material consolidado, sólido ausente de partículas que exhiban movimiento, como roca, cantos rocosos y basamientos volcánicos.

Fondo semiduro: lecho subacuático compuesto por material granular cohesionado, cuyas partículas no se mueven entre sí, como canchagua, tertel o laja, o cubiertos por partículas de gran diámetro que sólo se mueven por efecto de fuertes corrientes u oleajes como bolones o huevillos.

Macrofauna bentónica: organismos que habitan en los sedimentos blandos y que son retenidos por un tamiz de 1 mm de abertura.

Sistema de producción extensivo: cultivo de recursos hidrobiológicos cuya alimentación durante la etapa de engorda se realiza en forma natural o con una escasa intervención antrópica.

Sistema de producción intensivo: cultivo de recursos hidrobiológicos cuya alimentación en etapa de engorda se basa principalmente en dietas suministradas antrópicamente y/o en la fertilización de las aguas en que se realiza.

ANEXO 2: METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS

Contenido de Materia Orgánica:

La técnica utilizada comprende la medición de la pérdida de masa de la muestra después de realizar una combustión seca del material orgánico. Esta metodología, contempla las siguientes etapas:

- a) Se deberá extraer aproximadamente 100 g de sedimento desde la draga y sólo hasta 3 cm de profundidad;
- b) Tales muestras se trasladarán refrigeradas (4°C) hasta llegar al laboratorio;
- c) Se deberá tomar una submuestra de 10 g y mantener a 60°C hasta alcanzar peso constante;
- d) Se deberá calcinar la submuestra a 450°C (mufla) durante 5 horas;
- e) Se deberá pesar la muestra calcinada; y
- f) Se deberá calcular la pérdida de peso correspondiente a materia orgánica y expresarlo en porcentaje.

Medición del Potencial Redox y pH

La medición del pH y potencial redox de los tres primeros centímetros del sedimento, se deberá realizar directamente por medio de microelectrodos diseñados para tal fin (principalmente electrodo de platino).

- a) Se deberá utilizar un pH-metro que tenga compensador de temperatura, el microelectrodo de la sonda redox deberá ser de platino, oro o grafito.

- b) Previo a las mediciones ya señaladas, deberá calibrarse el pH-metro y la sonda redox para agua de mar o agua dulce, según corresponda, de acuerdo a las instrucciones del fabricante.
- c) Para efectuar la medición del potencial redox y pH, se podrán tomar directamente muestras de sedimentos por medio de corer. Una vez en la embarcación se procederá a introducir los microelectrodos en los primeros 3 centímetros del sedimento y registrar los valores entregados por los equipos.

Medición del Oxígeno Disuelto:

- A. Se deberá realizar mediciones en la columna de agua en las cuales se registren las concentraciones de oxígeno disuelto (mL/L) y porcentaje de saturación, al menos, cada 5 metros, desde los 10 metros de profundidad, hasta el fondo, siendo la medición más profunda, la correspondiente a 1 metro desde el fondo.
- B. Estas mediciones deberán ser realizadas una sola vez para la CPS y cada dos meses durante la etapa de operación. En la Información Ambiental se deberán entregar datos de los 12 últimos meses, en forma de tablas y gráficos.
- C. En el caso de la CPS, el perfil de oxígeno disuelto se deberá realizar en el centro del área solicitada en concesión. En el caso de la Información Ambiental, el perfil de oxígeno disuelto se deberá realizar bajo dos módulos de cultivo:
- D. Podrán utilizarse cualquiera de las siguientes técnicas de medición:
 - a. Medición in situ: corresponde a la utilización de un oxigenómetro con sonda capaz de sumergirse a las profundidades requeridas. Esta sonda deberá contar con compensador de temperatura.
 - b. Medición ex situ: corresponde a la utilización de un oxigenómetro, que deberá contar con compensador de temperatura. En este caso se deben

obtener las muestras de agua de la profundidad requerida con botellas oceanográficas y realizar inmediatamente las mediciones a bordo (no más de 5 minutos).

- c. Medición en laboratorio: corresponde a tomada de muestras de agua con botellas oceanográficas y su posterior análisis en el laboratorio a través del método Winkler modificado por Carpenter (1965).

En el caso de utilizarse las técnicas señaladas en las letras a) o b), las sondas se deberán calibrar previamente realizando mediciones de control a través del método Winkler modificado por Carpenter (1965).