

Análisis de un sistema de recuperación de sólidos y grasas en el agua de bombeo de una planta de harina y aceite de pescado

Analysis of a solid and fat recovery system in pumping a water plant of flour and fish oil

Recibido: abril 18 de 2018 | Revisado: mayo 17 de 2018 | Aceptado: junio 05 de 2018

TERRY CALDERÓN VÍCTOR MANUEL¹
JOSÉ CANDELA DÍAZ²
ELVA ADRIANZEN MATIENZO^M

RESUMEN

Se planteó un algoritmo que permitía determinar el rendimiento del sistema de mitigación implementado en una planta de elaboración de harina y aceite de pescado con el objetivo de tratar el agua de bombeo que se vierte al cuerpo receptor (mar), la misma que causa deterioro al ecosistema. El sistema de mitigación consta, fundamentalmente, de dos equipos: el tamiz rotatorio (trommel) y la celda de flotación. Sus funciones son el de recuperar los sólidos en suspensión y el aceite que el agua de bombeo posee y de esa forma mitigar a este efluente industrial. El análisis se efectuó evaluando la información obtenida vía experimental de las composiciones químicas de los efluentes del sistema y empleando como herramientas de análisis la estadística descriptiva y la aplicación del principio de conservación de la materia. Los resultados obtenidos fueron los siguientes: partículas recuperadas en el tamiz rotatorio 0,0682 TM/TM, espuma recuperada en la celda de flotación 0,0718 TM/TM, agua de bombeo tratada y enviada al emisor 0,54 TM/TM. La eficiencia del tratamiento fue: eficiencia en la recuperación de sólidos totales 29,44 % y la eficiencia en la recuperación del aceite 57,02%.

Palabras clave: tecnología de mitigación, agua de bombeo, medio ambiente, tecnología de harina y aceite de pescado

ABSTRACT

An algorithm was raised that allowed to determine the performance of the mitigation system implemented in a plant for the elaboration of fishmeal and fish oil with the aim of treating the pumping water that is poured to the receiving body (sea), the same that causes deterioration to the Ecosystem. The mitigation system consists mainly of two equipment: the rotary sieve (trommel) and the flotation Cell. Its functions are to recover the suspended solids and the oil that the pumping water possesses and thus mitigate this industrial effluent. The analysis was carried out evaluating the information obtained by experimental of the chemical compositions of the effluents of the system and using as tools of analysis the descriptive statistic and the application of the principle of conservation of the Matter. The results obtained were as follows: particles recovered in the rotary sieve 0.0682 tm/tm, recovered foam in the flotation cell 0.0718 tm/tm, pumped water treated and sent to the emitter 0.54 Tm/tm. The efficiency of the treatment was: efficiency in the recovery of total solids 29.44% and the efficiency in the recovery of the oil 57.02%.

Key words: mitigation technology, pumping water, environment, fishmeal, technology and fish oil

1 E-mail: victor.terry@unfv.edu.pe
2 Facultad de Ocea., Pesquería, Ciencias Alimentarias y Acuic.
Universidad Nac. Federico Villarreal

Introducción

Desde 1957, la pesca extractiva y su procesamiento para producir harina y aceite de pescado inicia una expansión asombrosa. En 1963, fue posible una captura masiva y técnica de la anchoveta (*Engraulis ringens* J.) y de una producción de 64 500 toneladas que se incrementa a 2 millones en 1969 y a la cifra de 12,3 millones en 1970, colocando al Perú como primer productor de esa materia en el mundo. Pero a la par de la sólida columna de ingresos y provecho, irrumpió también un impacto al medio ambiente, lo que provocó una fuerte contaminación marina con sus efluentes, contaminación atmosférica con las emanaciones gaseosas y la concentración desordenada de la población, con sus problemas de salud pública, urbanización, servicios, conllevando riesgos no solo directos para los servidores de la industria, sino, por extensión a la comunidad.

En el proceso de elaboración de harina y aceite de pescado, el agua de mar es empleada para el transporte del pescado desde la embarcación a la planta, en una relación de 1:1 (agua de mar y pescado) luego esta retorna al mar bajo el nombre de agua de bombeo que es un efluente generado en la recepción del pescado en la planta de harina. (Landeo & Ruiz, 1992). Esta agua de bombeo presenta una variedad de sustancias orgánicas denominadas solubles e insolubles, como son los glóbulos grasos, proteínas, escamas, aminoácidos libres, péptidos, etc. Los elementos constituyentes del pescado forman grupos versátiles de biopolímeros complejos con propiedades físico - química y biológicas únicas.

Si consideramos que en el Perú es la segunda actividad que aporta contaminantes orgánicos al medio marino en gran volumen, siendo la primera las descargas domésticas de las ciudades costeras, existe una preocupación por parte de las empresas en el tratamiento primario de sus residuales. (Hinojosa y Barrera 1998). Teniendo en cuenta que se emplea una relación de 2 m³ agua de mar por 1 tonelada de pescado y que se desembarcan cerca de 10 millones de tone-

ladas del recurso como promedio y por lo tanto se está utilizando 20 millones de m³ de agua de mar como fluido de transporte, el cual tiene una composición porcentual promedio: sólido 4,3%, grasa 1,04% y agua 94,6% por lo que no es sometida a tratamiento de recuperación físico y/o químico, por cada tonelada de materia prima descargada en poza, se estaría arrojando al mar contaminándolo 26,392 Kg de sólido orgánico y 23,163 Kg de grasa (Grados, 1996).

Estas sustancias biodegradables son responsables de la contaminación del ambiente marino que fue preocupación de los Organismos Internacionales. En el Perú, el Ministerio de Pesquería en concordancia con el Código del Medio Ambiente contempla la protección y conservación del mismo. Con las declaraciones de Santiago, la Convención del Mar, así como la Comisión Permanente del Pacífico Sur se observa los aspectos de interés de los principales rectores del medio, asumida por los países y empresas.

La Ley General de Pesca en el artículo N° 6 menciona la adopción de medidas necesarias para prevenir, reducir y controlar los daños o riesgos de contaminación o deterioro en el ambiente marino, terrestre y atmosférico. Con fecha 16 de diciembre de 1994 mediante Resolución Ministerial N° 478 - 94 -PE, el Ministerio de Pesquería fijó los límites permisibles para estos efluentes y con fecha 05 de abril de 1996 mediante Resolución Ministerial N° 208 - 96 - PE, los dejó sin efecto, en tanto el IMARPE precise los límites permisibles por áreas geográficas, así como se superen las condiciones actuales que dificulta el tratamiento del efluente agua de bombeo, hasta la fecha, los nuevos límites permisibles no han sido promulgados (Martínez & Aldave, 1998).

En 1995, se inició el Estudio de Impacto Ambiental en el cual se exige que las empresas pesqueras se adecúen al Programa de Adecuación al Medio Ambiente (P.A.M.A). Las Empresas Pesqueras implementan sus medidas de mitigación con la adquisición de Tecnología de Punta para el tratamiento de sus efluentes

para lo cual se recurre al tratamiento primario de los efluentes que significa la separación de los sólidos y grasas empleando métodos físicos como son las operaciones de separación por tamices, flotación y centrifugación (Czys, 1990) con lo cual se obtiene un efluente libre de sólidos y grasa que se vierte al mar. Los otros efluentes como la sanguaza y el agua de cola se integran totalmente, al proceso de elaboración de harina y aceite de pescado.

Se utilizan los resultados de las evaluaciones químicas que se dan en cada operación del proceso productivo. Estas evaluaciones deberán ser tratadas en forma estadística para posteriormente, aplicando el principio de conservación de la materia (Himmelblau, 1994) determinar el rendimiento teórico y compararlo con el práctico a fin de obtener un valor índice comparativo que determinará el rendimiento operativo de dichos equipos y plantear además un instructivo para analizar los datos que se obtienen del proceso productivo.

El análisis del sistema plantea los siguientes objetivos:

- La determinación de la composición química en todas las operaciones en donde la tecnología de mitigación ha sido instalada.
- Determinación estadística de valores centrales promedios para su estudio y prueba de t student (Quezada, 2010).
- Planteamiento de un balance de materia en el proceso de recuperación.
- El estudio de los rendimientos del sistema implementado.

Materiales y Método

Materia prima

El recurso empleado fue la anchoveta (*Engraulis ringens J.*) en una Planta de Harina y Aceite de Pescado que elabora harina de tipo Prime.

La unidad experimental

La unidad experimental que se utilizó para el tratamiento primario del agua de bombeo comprende los siguientes principales equipos:

Tamiz rotatorio (trommel)

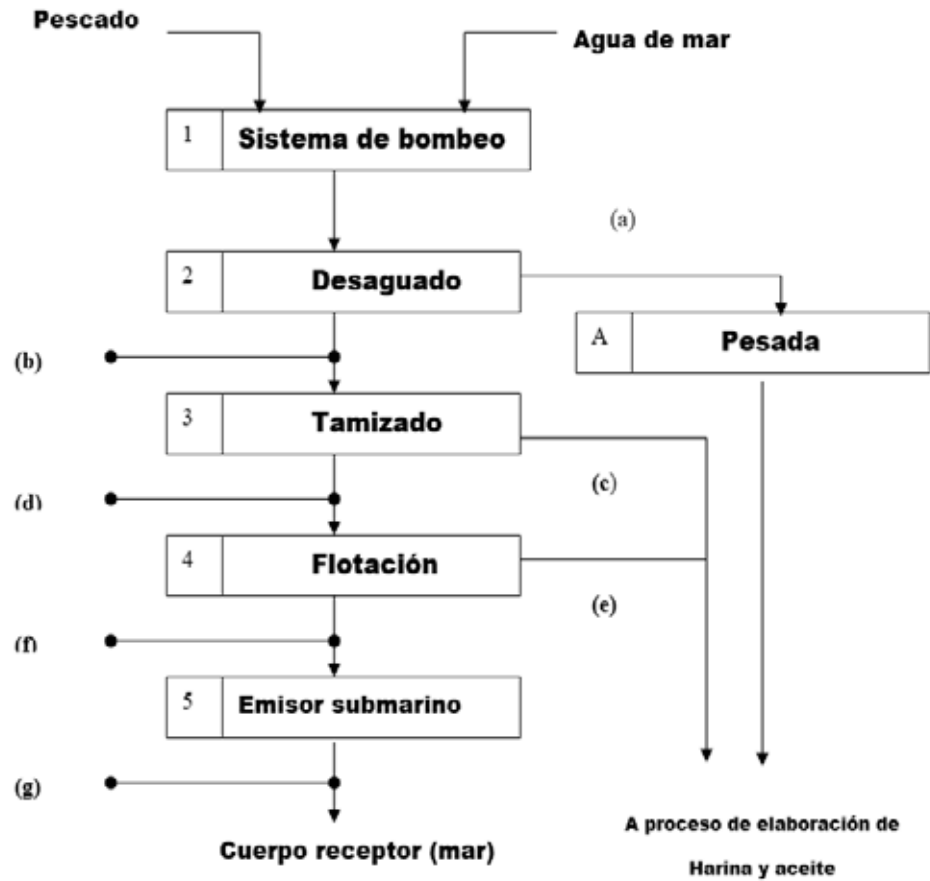
Para la recuperación de los sólidos en suspensión del agua de bombeo, la planta cuenta con un equipo de las siguientes características: Marca Contra Shear, modelo 15/40 B, diámetro 1,55 m, largo de la zona filtrante 4,32 m, altura total 1,73 m, largo total 5,40 m ancho total, 2,03 m. El equipo es un tamiz rotatorio, construido de acero inoxidable, donde se recuperan sólidos mayores a 1 mm Unidad de Microburbujas, celda de flotación

El agua que ha sido filtrada en el tamiz rotatorio fluye hacia la unidad de microburbujas, que es un recuperador de sólidos y aceite, denominado sistema DYAF (celda de flotación con inyección de microburbujas), y tiene las siguientes características:

Marca: Taylor, modelo TEI – DYAF –100, capacidad 600 m³ /h

El sistema de tratamiento del agua de bombeo se puede observar en la Figura 1, donde se muestra la obtención del agua de bombeo, como un efluente industrial y las respectivas operaciones de recuperación de sólidos y aceite y la descarga del agua de bombeo tratada hacia el cuerpo receptor mediante un emisor submarino.

Las principales operaciones son las siguientes: descarga, desaguador estático, tamizado empleando el trommel, la celda de flotación por microburbujas y el emisor submarino.



a	Pescado desaguado
b	Agua de bombeo
c	Partículas en suspensión (mayor a 1 mm) recuperadas en el tamiz rotatorio (trommel)
d	Agua de bombeo saliendo del tamiz rotatorio e ingresando a la celda de flotación
e	Espuma recuperada de la flotación (celda) formada por sólidos (menores a 1 mm) en Suspensión y grasa
f	Agua de bombeo con tratamiento primario al emisor submarino
g	Agua de bombeo diluida en el cuerpo receptor

Figura 1. Sistema de tratamiento del agua de bombeo

Identificación de efluentes

Los siguientes efluentes fueron objeto de muestreo:

- Agua de bombeo (punto b, en el Diagrama de flujo)
- Partículas recuperadas en el Tamiz rotatorio (punto c) (Trommel)
- Agua de Bombeo a la salida del Tamiz rotatorio (punto d) (Trommel)
- Espuma recuperada en la celda de flotación (punto e),

- Agua de bombeo a la salida de la celda de flotación e enviada al emisor submarino (punto f).

Análisis químicos

Los parámetros evaluados fueron de acuerdo al Protocolo de Monitoreo de Efluentes de la Industria Pesquera de Consumo Humano Indirecto según la Resolución Ministerial N° 721-97-pe, Lima,

14 de noviembre de 1997, donde se describe la metodología de trabajo.

Estos parámetros fueron: **SÓLIDOS TOTALES (ST)**. También considerados como residuo total, formados por partículas orgánicas e inorgánicas (El contenido de humedad sale de la diferencia de peso de la muestra y el contenido de Sólidos Totales), y aceites y grasas, que de acuerdo a la Resolución Ministerial son métodos aplicables a aguas de bombeo, desagüe y sanguaza o efluentes industriales

El algoritmo del sistema

El algoritmo planteado para el trabajo está planteado en la Figura 2 que sintetiza el diseño experimental.

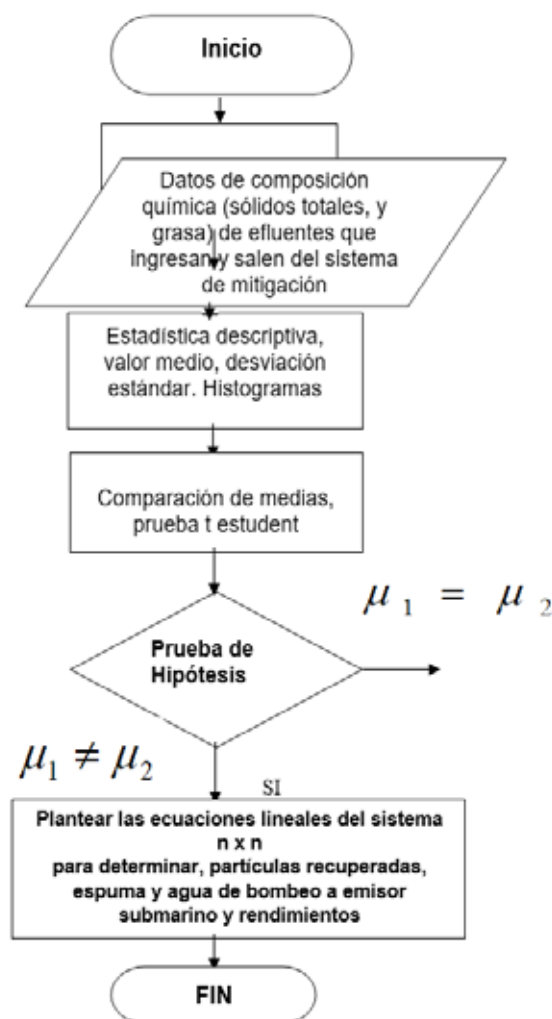


Figura 2. Algoritmo del sistema

Resultados

Tamaño de la muestra

De acuerdo a la ecuación:

$$N = \frac{3,84 \cdot p \cdot q}{e^2}$$

Dónde:

N: Tamaño de la muestra

p: Casos favorables del proceso (%)

q: Casos desfavorables del proceso (%)

e: error permisible

Al ser un procedimiento industrial sometido a control de operación se considera que un 95% está regulado.

Sustituyendo valores en la ecuación tenemos:

$$N = \frac{3,84(95)(5)}{10^2} = 18.24$$

$$N = 19 \text{ muestras}$$

Se requiere un mínimo de 19 muestras equivalentes a los días de trabajo. Para el presente estudio se programaron 23 muestras en 23 días

El modelo matemático

El modelo matemático propuesto es del tipo fenomenológico (Ayala & Pardo, 1995), el cual se fundamenta en el principio de conservación de la materia y en los dos primeros términos de la serie de Taylor.

El agua de bombeo con un flujo másico de entrada (m_e) y una composición en sólidos totales (x_s), grasa (x_g) y humedad (x_h), ingresa a un sistema de tratamiento primario compuesto por un tamiz rotatorio y una celda de flotación, donde se recupera un material particulado (m) y espuma (m_1) dando una masa total tal como M , la cual tiene una composición de sólidos totales (M_s), grasa (M_g) y humedad (M_h), para ingresar al procesamiento de harina y aceite de pescado y evacuando al emisor submarino un efluente de agua de bombeo tratada (m_s), con una composición de sólidos totales (m_{s1}), grasa (m_{g1}) y humedad (m_{h1}). Himmelblau (1994).

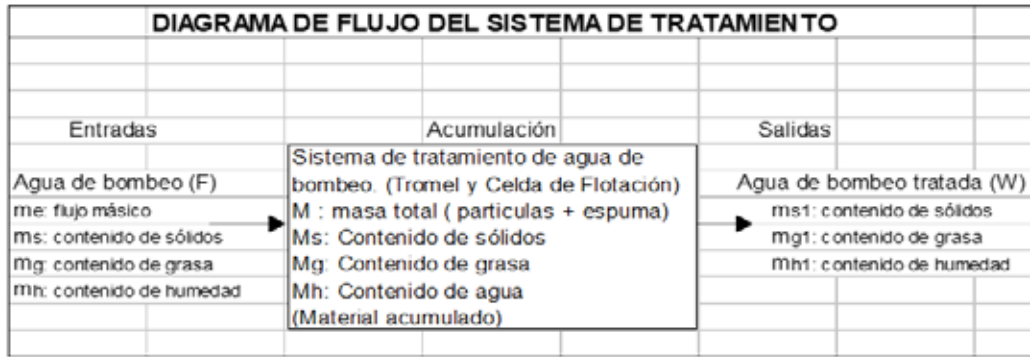


Figura 3. Estructura del modelo

Tabla 1
Modelo matemático

Entrada	.t	.t+Δt
Flujo masico (m _e)	.m _e	$m_e + \frac{dm_e}{dt} \cdot \Delta t$
<ul style="list-style-type: none"> • De los sólidos (m_s) 	(m _s)	$m_s + \frac{dm_s}{dt} \cdot \Delta t$
<ul style="list-style-type: none"> • De la grasa (m_g) 	(m _g)	$m_g + \frac{dm_g}{dt} \cdot \Delta t$
<ul style="list-style-type: none"> • De la humedad (m_h) 	(m _h)	$m_h + \frac{dm_h}{dt} \cdot \Delta t$
Salida	.t	.t+Δt
Flujo Masico(m _s)	.m _s	$m_s + \frac{dm_s}{dt} \cdot \Delta t$
<ul style="list-style-type: none"> • De los sólidos (m_{s1}) 	(m _{s1})	$m_{s1} + \frac{dm_{s1}}{dt} \cdot \Delta t$
<ul style="list-style-type: none"> • De la grasa (m_{g1}) 	(m _{g1})	$m_{g1} + \frac{dm_{g1}}{dt} \cdot \Delta t$
<ul style="list-style-type: none"> • De la humedad (m_{h1}) 	(m _{h1})	$m_{h1} + \frac{dm_{h1}}{dt} \cdot \Delta t$
Acumulación	.t	.t+Δt
Masa Acumulada(M)	M	$M + \frac{dM}{dt} \cdot \Delta t$
<ul style="list-style-type: none"> • De los sólidos (M_s) 	(M _s)	$M_s + \frac{dM_s}{dt} \cdot \Delta t$
<ul style="list-style-type: none"> • De la grasa (M_g) 	(M _g)	$M_g + \frac{dM_g}{dt} \cdot \Delta t$
<ul style="list-style-type: none"> • De la humedad (M_h) 	(M _h)	$M_h + \frac{dM_h}{dt} \cdot \Delta t$

Para un tiempo tal como $t=\Delta t$, la ecuación para en flujo másico planteada y basado en el principio (*Entradas - Salidas = Acumulación.*)

$$(m_e + \frac{dm_e}{dt} \cdot \Delta t) \Delta t - (m_s + \frac{dm_s}{dt} \cdot \Delta t) \Delta t = m + \frac{dm}{dt} \Delta t - m \quad (1)$$

Simplificando la ecuación propuesta queda

$$\frac{dM}{dt} = m_e - m_s \quad (2)$$

En las operaciones no se presentan acumulación del valor $dm/dt=0$, por lo cual la

ecuación (2) queda:

$$m_e = m_s \quad (3)$$

El valor medio de los datos obtenidos

Los datos de agua de bombeo, partículas recuperadas en el trommel y espuma obtenida en las celdas de flotación, y agua de bombeo tratada, se analizaron estadísticamente como sigue:

Análisis de los datos de agua de bombeo, partículas recuperadas en el Trommel y espuma obtenida en las celdas de flotación, y agua de bombeo tratada se analizó de acuerdo al análisis estadístico:

Tabla 2

Fórmulas estadísticas de tratamiento de datos

Nº	Nombre	Ecuación
1	Promedio para valores no agrupados (x)	$x = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n}$
2	Desviación Estándar (s)	$s = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n (X_i - x)^2\right) \cdot (N - 1)^{-1}}$
3	Intervalo de confianza (IC)	$IC = x \pm S_m$ $S_m = t_{95\% \cdot n-1} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}$
4	Prueba t-student	Hipótesis $\mu_1 = \mu_2$ $\mu_1 \neq \mu_2$

Prueba de significación e hipótesis para las diferencias medias

Se determinó, estadísticamente, si existían diferencias significativas, entre la composición del agua de bombeo que ingresaba al sistema de mitigación y el agua de bombeo tratada en el tamiz rotatorio y la celda de flotación.

Esto indicaba que debía analizarse el contenido de sólidos totales y grasa del agua de bombeo que ingresaba al sistema y del agua de bombeo tratada que se enviaba al emisor submarino, y esto es posible

aplicando una prueba de significación para diferencias de las medias. Los datos que se analizaron corresponden a 23 muestras de agua de bombeo dividida en dos etapas del proceso:

- Ingreso al sistema de mitigación como agua de bombeo.
- Salida de la celda de flotación al emisor submarino después del tratamiento.

El cálculo se hizo efectivo utilizando el programa Excel y de acuerdo a la Tabla 1

Tabla 3
Valores de contenido de grasa y sólidos totales de los efluentes que ingresan y salen del sistema de mitigación.

Dia	AGUA DE BOMBEO		AGUA DE BOMBEO A EMISOR	
	%G	%ST	%G	%ST
1	1.24	6.59	0.67	5.22
2	2.08	7.02	1.52	5.48
3	2.3	6.3	1.71	4.2
4	1.18	5.64	0.77	4.97
5	1.78	7.48	1.15	5.66
6	1.45	6.77	1.09	4.97
7	1.27	7.74	0.72	5.06
8	1.97	6.13	0.86	4.81
9	2.56	6.78	0.83	4.47
10	5.8	8.86	2.17	7.06
11	1.25	6.52	0.75	4.56
12	2.05	8.91	0.12	4.5
13	0.78	5.17	0.32	4.21
14	3.07	8.2	1.99	6.56
15	0.85	5.99	0.31	4.82
16	2.03	6.76	0.64	4.87
17	1.49	7.71	0.2	4.28
18	0.67	4.62	0.34	4.12
19	3.58	9.59	2.15	6.43
20	0.69	4.87	0.43	4.34
21	0.52	4.81	0.35	4.25
22	0.75	4.76	0.39	4.35
23	0.82	5.08	0.57	4.45

La prueba t, para medias de dos muestras emparejadas para el contenido de grasa en el agua de bombeo y el agua de bombeo que sale después del tratamiento en el sistema, se plantearon las siguientes hipótesis:

Hipótesis nula (H₀)

No existen diferencias significativas en el tratamiento realizado sobre el agua de bombeo en la recuperación del contenido de grasa, a un nivel de significación del 5%, las medias son iguales

$$\mu_1 = \mu_2$$

Hipótesis alterna (H)

Existen diferencias significativas en el tratamiento realizado sobre el agua de bombeo

en la recuperación del contenido de grasa, a un nivel de significación del 5%, las medias son iguales.

$$\mu_1 \neq \mu_2$$

Aplicando el programa Excel, se obtuvo el siguiente resultado que se muestran en la siguiente Tabla.

Tabla 4
Prueba t para medias de dos muestras emparejadas, para el contenido de grasa

VALORES ESTADÍSTICOS	AGUA DE BOMBEO	AGUA DE BOMBEO A EMISOR SUBMARINO
Media	1,746956522	0,87173913
Varianza	1,428203953	0,394178656
Observaciones	23	23
Grados de libertad	44	
Estadístico t	3,109281736	
P(T<=t) una cola	0,001642321	
Valor crítico de t (una cola)	1,680230071	

Prueba de hipótesis

$$p < t_{0,05}$$

Siendo el valor crítico para una cola menor que el estadístico, se rechaza la hipótesis nula. Se llega a la siguiente conclusión

Conclusión: Existen diferencias significativas a un nivel de significación del 0,05, en el contenido de grasa entre los efluentes: agua de bombeo y el tratado en el sistema de mitigación.

La prueba t, para medias de dos muestras emparejadas para el contenido de sólidos totales en el agua de bombeo y el agua de bombeo que sale después del tratamiento, se plantearon las siguientes hipótesis:

Hipótesis nula (Ho)

No existen diferencias significativas en el tratamiento realizado sobre el agua de bombeo en la recuperación del contenido de sólidos totales, a un nivel de significación del 5%.

Existen diferencias significativas en el tratamiento realizado sobre el agua de bombeo en la recuperación del contenido de sólidos totales, a un nivel de significación del 5%.

$$\mu_1 \neq \mu_2$$

El resultado de aplicar el programa Excel se muestra en la Tabla siguiente

Hipótesis alterna (H)

Tabla 5

Prueba t para medias de dos muestras emparejadas, para el contenido de sólidos totales

VALORES ESTADÍSTICOS	AGUA DE BOMBEO	AGUA DE BOMBEO A EMISOR SUBMARINO
Media	6,62173913	4,940869565
Varianza	2,044169565	0,656881028
Observaciones	23	23
Grados de libertad	44	
Estadístico t	4,904	
P(T<=t) una cola	6,59541E-06	
Valor crítico de t (una cola)	1,680230071	

Prueba de hipótesis

$$p < t_{0,05}$$

Siendo el valor crítico para una cola menor que el estadístico, se rechaza la hipótesis nula, obteniéndose la siguiente conclusión:

De acuerdo al análisis estadístico, se encuentra que existen diferencias significativas entre la composición del agua de bombeo a la entrada del sistema y al agua de bombeo tratada y enviada al emisor submarino, lo cual implica que se aplica el principio de conservación de la materia (entradas=salidas)

Conclusiones

Existen diferencias significativas a un nivel de significación del 0,05, en el contenido de sólidos entre los efluentes: agua de bombeo y el tratado en el sistema de mitigación.

Planteamiento del balance de materiales para el sistema de mitigación

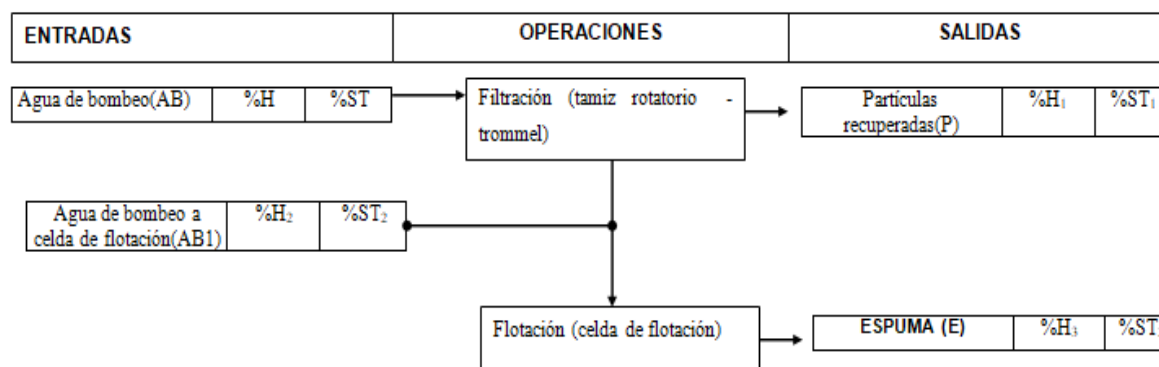


Figura 4. El planteamiento del balance de materiales está de acuerdo a la composición de los flujos de entrada y salida de cada operación unitaria que conforma el sistema de mitigación (tamiz rotatorio y celda de flotación).

Basándonos en el principio de conservación de la materia se plantearon las ecuaciones lineales del sistema, considerando los valores proporcionados vía experimental y

consignados en las siguientes tablas.

Tabla agua de bombeo que ingresa al Trommel (AB), Partículas recuperadas en el Trommel, y agua de bombeo tratada (AB1)

Tabla 6

Valores químicos del agua de bombeo, partículas recuperadas y agua de bombeo tratada que salen del trommel

Día	Agua de bombeo(AB)				Partículas recuperadas(P)				Agua de bombeo(AB1)			
	%H	%ST	%G	%S	%H ₁	%ST ₁	%G ₁	%S ₁	%H ₂	%ST ₂	%G ₂	%S ₂
1	93,41	6,59	1,24	5,35	83,24	16,76	2,11	14,65	94,40	5,60	0,90	4,70
2	93,88	6,12	2,08	4,04	83,56	16,44	1,88	14,56	94,40	5,60	0,80	4,80
3	93,70	6,30	2,30	4,00	82,50	17,50	1,86	15,64	94,23	5,77	0,80	4,97
4	94,36	5,64	1,18	4,46	82,36	17,64	1,82	15,82	95,14	4,86	0,80	4,06
5	92,52	7,48	1,78	5,70	82,27	17,73	1,70	16,03	93,69	6,31	0,80	5,51
6	93,23	6,77	1,45	5,32	82,20	17,80	1,62	16,18	93,44	6,56	0,60	5,96
7	92,26	7,74	1,27	6,47	80,48	19,52	1,13	18,39	92,78	7,22	0,40	6,82
8	93,87	6,13	1,97	4,16	80,61	19,39	1,22	18,17	93,90	6,10	0,40	5,70
9	93,22	6,78	2,56	4,22	81,05	18,95	1,23	17,72	93,95	6,05	0,48	5,57
10	91,14	8,86	5,80	3,06	81,58	18,42	1,57	16,85	93,34	6,66	0,50	6,16
11	93,48	6,52	1,25	5,27	81,46	18,54	1,32	17,22	93,90	6,10	0,50	5,60
12	91,09	8,91	2,05	6,86	81,10	18,90	1,30	17,60	93,04	6,96	0,50	6,46
13	94,83	5,17	0,78	4,39	80,40	19,60	1,12	18,48	95,10	4,90	0,20	4,70
14	91,80	8,20	3,07	5,13	80,30	19,70	1,12	18,58	92,53	7,47	0,14	7,33
15	94,03	5,97	0,85	5,12	78,40	21,60	1,02	20,58	94,98	5,02	0,12	4,90
16	93,94	6,06	2,03	4,03	77,96	22,04	0,78	21,26	94,87	5,13	0,10	5,03
17	92,49	7,51	1,49	6,02	77,55	22,45	0,63	21,82	93,21	6,79	0,07	6,72
18	95,38	4,62	0,67	3,95	77,47	22,53	0,24	22,29	97,30	2,70	0,06	2,64
19	90,41	9,59	3,58	6,01	84,10	15,90	2,12	13,78	94,51	5,49	1,00	4,49
20	94,13	5,87	0,69	5,18	84,22	15,78	2,43	13,35	94,65	5,35	1,00	4,35
21	95,19	4,81	0,52	4,29	84,26	15,74	2,50	13,24	95,70	4,30	1,26	3,04
22	95,24	4,76	0,75	4,01	84,29	15,71	2,56	13,15	96,30	3,70	1,40	2,30
23	94,92	5,08	0,82	4,26	84,64	15,36	2,58	12,78	96,12	3,88	1,50	2,38

Tabla 7

Agua de bombeo que ingresa a la celda de flotación (AB1), se recupera la espuma (E) y se envía el agua de bombeo tratada al emisor submarino (A)

Día	BOMBEO(AB1)				ESPUMA(E)				EMISOR(AB2)			
	%H ₂	%ST ₂	%G ₂	%S ₂	%H ₃	%G ₃	%ST ₃	%S ₃	%H ₄	%G ₄	%ST ₄	%S ₄
1	94,40	5,60	0,90	4,70	80,73	14,70	19,26	4,56	94,78	0,67	5,22	4,55
2	94,40	5,60	0,80	4,80	79,92	16,10	20,08	3,98	95,29	1,52	5,13	3,61
3	94,23	5,77	0,80	4,97	75,10	22,40	24,90	2,50	95,80	1,71	5,41	3,70
4	95,14	4,86	0,80	4,06	76,88	18,90	23,12	4,22	95,81	0,77	5,37	4,60
5	93,69	6,31	0,80	5,51	75,17	20,30	24,83	4,53	94,43	1,15	5,57	4,42
6	93,44	6,56	0,60	5,96	77,90	18,20	22,09	3,89	95,03	1,09	4,97	3,88
7	92,78	7,22	0,40	6,82	80,24	15,40	19,76	4,36	94,94	0,72	5,06	4,34
8	93,90	6,10	0,40	5,70	74,33	21,70	25,67	3,97	95,19	0,86	4,81	3,95
9	93,95	6,05	0,48	5,57	77,44	18,90	22,56	3,66	95,53	0,83	4,47	3,64
10	93,34	6,66	0,50	6,16	79,69	15,40	20,31	4,91	93,98	2,17	6,02	3,85
11	93,90	6,10	0,50	5,60	73,77	22,40	26,23	3,83	95,44	0,75	4,56	3,81
12	93,04	6,96	0,50	6,46	87,20	8,40	12,80	4,40	95,50	0,12	4,50	4,38
13	95,10	4,90	0,20	4,70	73,69	22,40	26,30	3,90	95,79	0,32	4,21	3,89
14	92,53	7,47	0,14	7,33	73,04	22,40	26,95	4,55	93,47	1,99	6,53	4,54
15	94,98	5,02	0,12	4,90	73,77	21,70	26,23	4,53	95,18	0,31	4,82	4,51
16	94,87	5,13	0,10	5,03	66,35	29,40	33,64	4,24	95,13	0,64	4,87	4,23
17	93,21	6,79	0,07	6,72	70,70	25,20	29,29	4,09	95,72	0,20	4,28	4,08
18	97,30	4,70	0,06	4,64	83,60	12,60	16,34	3,74	98,87	0,34	4,99	4,65
19	94,51	5,49	1,00	4,49	79,60	16,10	20,39	4,29	94,87	2,15	5,13	2,98
20	94,65	5,35	1,00	4,35	65,97	30,10	34,02	3,92	95,66	0,43	4,34	3,91
21	95,70	5,87	1,26	4,61	71,58	24,50	28,41	3,91	95,75	0,35	4,25	3,90
22	96,30	5,70	1,40	4,30	68,72	27,30	31,27	3,97	97,01	0,39	4,38	3,99
23	96,12	5,61	1,50	4,11	69,50	26,60	30,49	3,89	97,88	0,57	4,12	3,55

Entradas = Salidas

Se ha considerado como base de cálculo: : 100 TM de agua de bombeo

$$AB = 100 \text{ TM}$$

Para la operación de filtración se establece el balance por componentes:

Ecuación general

$$P + AB1 = AB$$

Ecuación de contenido de humedad:

$$\%H_1(P) + \%H_2(AB1) = \%H(AB)$$

Ecuación para el contenido de sólidos totales

$$\%ST_1(P) + \%ST_2(AB1) = \%ST(AB)$$

Para la operación de flotación se estableció el balance por componentes

Ecuación general

$$AB2 + E = AB1$$

Ecuación para el contenido de humedad

$$\%H_4(AB2) + \%H_3(E) = \%H_2(AB1)$$

Ecuación para el contenido de sólidos totales

$$\%ST_4(AB2) + \%ST_3(E) = \%ST_2(AB1)$$

Con lo cual se estructuró un sistema de cuatro ecuaciones x cuatro incógnitas, las cuales se organizaron de la forma siguiente:

$$\%H_1(P) + \%H_2(AB1) = \%H(AB)$$

$$\%ST_1(P) + \%ST_2(AB1) = \%ST(AB)$$

$$\%H_4(AB2) + \%H_3(E) - \%H_2(AB1) = 0$$

$$\%ST_4(AB2) + \%ST_3(E) - \%ST_2(AB1) = 0$$

Formándose la matriz

$$m = \begin{bmatrix} \%H_1 & \%H_2 & 0 & 0 \\ \%ST_1 & \%ST_2 & 0 & 0 \\ 0 & -\%H_2 & \%H_3 & \%H_4 \\ 0 & -\%ST_2 & \%ST_3 & \%ST_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \%H(AB) \\ \%ST(AB) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Resultados

Utilizando software matemático Mathcad 2014 para resolver la matriz aplicada a las 23 muestras, se calcula de esa forma los flujos de entrada y salida de las operaciones unitarias del sistema de mitigación. Los resultados fueron los siguientes:

Tabla 8

Resultado del Balance de materiales

DÍA	BASE DE CALCULO (TM) AGUA DE BOMBEO (AB)	PARTICULAS RECUPERADAS (P) (TM)	AGUA DE BOMBEO INGRESANDO A LA CELDA DE FLOTACIÓN (AB1) (TM)	ESPUMA RECUPERADA (E) (TM)	AGUA DE BOMBEO ENVIADA A EL EMISOR SUBMARINO (AB2) (TM)
1	100	8,87	91,13	2,46	88,66
2	100	4,80	95,20	5,51	89,69
3	100	4,52	95,48	7,24	88,24
4	100	6,10	93,89	3,32	90,56
5	100	1024	89,75	3,44	86,30
6	100	1,87	98,13	9,11	89,02
7	100	4,22	95,77	14,07	81,69
8	100	0,23	99,77	6,16	93,60
9	100	5,65	94,34	8,24	86,16
10	100	18,71	91,29	4,08	87,20
11	100	3,99	96,00	6,82	89,17
12	100	16,33	83,67	24,79	58,87
13	100	1,83	98,16	3,06	95,09
14	100	5,97	94,03	4,32	89,70
15	100	5,79	94,27	0,88	93,39
16	100	5,50	94,50	0,85	93,64
17	100	4,59	95,40	9,57	85,82
18	100	9,68	91,13	21,17	71,78
19	100	9,38	90,62	1,43	59,18
20	100	4,98	95,01	3,23	91,77
21	100	4,45	95,54	6,13	90,90
22	100	8,82	91,17	8,54	84,45
23	100	10,45	89,54	10,89	80,19
	2300	156,97	2153,79	165,31	1965,07

Razón de partículas (P), espuma (E), agua de bombeo saliendo del Trommel (AB1), y el agua de bombeo saliendo de la celda de flotación y enviada al emisor submarino (AB2)

Para las partículas recuperadas en el tamiz rotatorio se obtuvo el siguiente valor:

$$Vu(particulas) = \frac{156,97}{2300} = 0,0682 \frac{TM(particulas)}{TM(agua.bombeo)}$$

Para las partículas más grasa, recuperadas en la celda de flotación se obtuvo el siguiente valor:

$$Vu(espuma) = \frac{165,31}{2300} = 0,0718 \frac{TM(espuma)}{TM(agua.bombeo)}$$

El agua de bombeo que sale del tamiz rotatorio tiene el siguiente valor:

$$Vu(AB1) = \frac{2153,79}{2300} = 0,936 \frac{TM(AB1)}{TM(agua.bombeo)}$$

El agua de bombeo tratada, y enviada al emisor submarino tiene el siguiente valor:

$$Vu(AB2) = \frac{1965,07}{2300} = 0,854 \frac{TM(AB2)}{TM(agua.bombeo)}$$

Tabla 9

Cálculo de la eficiencia de recuperación de sólidos

AGUA DE BOMBEO AB (TM)	%ST _E AGUA DE BOMBEO	SOLIDOS TOTALES ST _E	AGUA DE BOMBEO A EMISOR SUBMARINO AB2 (TM)	%ST _S AGUA DE BOMBEO A EMISOR	SOLIDOS TOTALES DE AGUA DE BOMBEO ST _S
100	5.60	5,60	88,66	5,22	4,63
100	5.60	5,60	89,69	5,13	4,60
100	5.77	5,77	88,24	5,41	4,77
100	4.86	4,86	90,56	4,51	4,08
100	6.31	6,31	86,30	5,57	4,81
100	6.56	6,56	89,02	4,97	4,42
100	7.22	7,22	81,69	5,06	4,13
100	6.10	6,10	93,60	4,81	4,50
100	6.05	6,05	86,16	4,47	3,85
100	6.66	6,66	87,20	6,02	5,25
100	6.10	6,10	89,17	4,56	4,07
100	6.96	6,96	58,87	4,50	2,65
100	4.90	4,90	95,09	4,21	4,00
100	7.47	7,47	89,70	6,53	5,86
100	5.02	5,02	93,39	4,82	4,50
100	5.13	5,13	93,64	4,87	4,56
100	6.79	6,79	85,82	4,28	3,67
100	4.70	4,70	71,78	4,99	3,58
100	5.49	5,49	59,18	5,13	3,04
100	5.35	5,35	91,77	4,34	3,98
100	5.87	5,87	90,90	4,25	3,86
100	5.70	5,70	84,45	4,38	3,70
100	5.61	5,61	80,19	4,12	3,30
	Total	135,82		Total	95,81

Eficiencia del sistema de recuperación de sólidos y grasa

El cálculo se fundamenta en lo siguiente:

- Aplicación del principio de conservación de materias
- Entradas = Salidas
- Para las entradas se consideró como base 23 días de muestreo, considerando como base de cálculo 100 TM con su respectivo % de sólidos totales que involucra (proteínas +sales minerales + grasa) Tabla 25.
- Para las salidas se consideró también los 23 días de muestreo, y para cada día se calculó mediante el balance de materiales la cantidad de agua de bombeo tratada que se vierte al medio receptor a través del emisor submarino, con su respectivo análisis de sólidos totales (proteínas + sales minerales + grasa).

Planteamiento de la ecuación

- Sea ST_e : Sólidos totales presente en el agua de bombeo
- Sea ST_s : Sólidos totales presente en el agua de bombeo tratada e enviada al emisor submarino
- Sea ξ : % de eficiencia del sistema
- Sea $\xi = \frac{(ST_e - ST_s).(100)}{ST_e}$

- $ST_e = 135,82$ TM sólidos totales en el agua de bombeo
- $ST_s = 98,81$ TM sólidos totales en agua de bombeo enviada al emisor submarino
- $(ST_e - ST_s) = 135,82 - 98,81$ TM de sólidos totales recuperados

$$\xi = \frac{(ST_e - ST_s) \cdot (100)}{ST_e}$$

Se obtuvo una eficiencia en la recuperación de los sólidos totales de:

$$\xi = 29,44\%$$

Tabla 10

Cálculo de la eficiencia de recuperación en aceite

Día	AGUA DE BOMBEO (AB)			AGUA DE BOMBEO A EMISOR (AB2)		
	TM	%G	Total Grasa(G) TM	TM	%G2	Total Grasa(G2) TM
1	100	1.24	1.24	88.66	0.67	0.59
2	100	2.08	2.08	89.69	1.52	1.36
3	100	2.3	2.3	88.24	1.71	1.51
4	100	1.18	1.18	90.56	0.77	0.70
5	100	1.78	1.78	86.3	1.15	0.99
6	100	1.45	1.45	89.02	1.09	0.97
7	100	1.27	1.27	81.69	0.72	0.59
8	100	1.97	1.97	93.6	0.86	0.80
9	100	2.56	2.56	86.16	0.83	0.72
10	100	5.8	5.8	87.2	2.17	1.89
11	100	1.25	1.25	89.17	0.75	0.67
12	100	2.05	2.05	58.87	0.12	0.07
13	100	0.78	0.78	95.09	0.32	0.30
14	100	3.07	3.07	89.7	1.99	1.79
15	100	0.85	0.85	93.39	0.31	0.29
16	100	2.03	2.03	93.64	0.64	0.60
17	100	1.49	1.49	85.82	0.2	0.17
18	100	0.67	0.67	71.78	0.34	0.24
19	100	3.58	3.58	59.18	2.15	1.27
20	100	0.69	0.69	91.77	0.43	0.39
21	100	0.52	0.52	90.9	0.35	0.32
22	100	0.75	0.75	84.45	0.39	0.33
23	100	0.82	0.82	80.19	0.57	0.46
Total	2300		40.18	1965.07		17.03

G_e : 40,18 TM grasa en el agua de bombeo

G_s : 17,03 TM grasa enviada al emisor submarino

Se obtiene una eficiencia en la recuperación de aceite de:

$$\xi_g = \frac{(G_e - G_s)}{G_e} \cdot 100 = 57,62\%$$

Discusión

Los estudios expuestos en los resultados realizados de acuerdo a una programación secuencial (algoritmo) permitieron determinar la composición química de los flujos que intervienen en el proceso basado en 23 muestras realizadas durante el periodo de producción (Quezada, 2010).

Estos comprenden la determinación de contenido de humedad, grasa, sólidos totales y sólidos. En concordancia con los métodos de análisis químicos propuestos en el protocolo proporcionado por el Ministerio de la Producción y expuesto en el capítulo de Materiales y Métodos.

Los análisis estadísticos realizados comprenden, según el programa o algoritmo, la determinación de los valores centrales (composición de los efluentes del sistema de mitigación) de acuerdo a la estadística descriptiva (promedio, varianza y desviación estándar, y los respectivos límites de confianza al 95%) Quezada (2010). Posteriormente, se efectuó una prueba de hipótesis para las medias, a fin de comprobar si existen diferencias significativas, en el tratamiento del agua de bombeo. La prueba de hipótesis determinó que es necesario continuar con el algoritmo. Concluido el análisis de la información se procedió al tratamiento de la misma a través del modelo matemático propuesto y de acuerdo con la programación presentada en Materiales y Métodos.

La aplicación del principio de conservación de la materia nos permitió definir el respectivo balance de materiales, con lo cual se determinó cuantitativamente los respectivos valores de los flujos que ingresan y salen de cada operación del tratamiento primario del agua de bombeo (Himmelblau, 1994). Para tal fin, se utilizó el Software Mathcad 2014, empleado en ingeniería que determina el flujo de ingreso y salida a cada operación unitaria del sistema de mitigación.

Era importante, el poder calcular la eficiencia del sistema, en la recuperación de los sólidos totales (proteínas, grasa, cenizas) y del aceite, esto se hizo factible conociendo la composición química a la entrada y salida del agua de bombeo al sistema de mitigación. Se hace notar que siendo el sistema de mitigación un tratamiento primario (físico), no se logra la recuperación de los materiales orgánicos solubles (proteínas, péptidos, aminoácidos, etc.)

Aplicando la técnica de muestreo para el presente trabajo se determinó un requerimiento de 23 muestras como mínimo, aplicadas al azar y bajo un equivalente de una muestra por día, sin considerar el tiempo que permanece el pescado en la bodega de la embarcación. (El estudio hace el análisis en base a 23 muestras).

La composición química de los efluentes se empleó para realizar el respectivo balance de materias, determinándose de esa forma los flujos que ingresan y salen de cada operación unitaria del sistema de mitigación. Como era de esperarse los valores obtenidos en la composición química del agua de bombeo, partículas recuperadas, agua de bombeo que ingresa a la celda de flotación y agua de bombeo que se envía al emisor submarino son variados y no se pudo encontrar una correlación estadística entre los respectivos parámetros.

La aplicación del principio de conservación de la materia permite obtener valores de los flujos de entrada y salida a cada operación unitaria del sistema de mitigación. Esto es factible planteando las respectivas ecuaciones lineales del sistema, y aplicando el software respectivo (Mathcad 2014). Se obtuvo los resultados globales para una base de cálculo de 100 TM de agua de bombeo por día y por 23 días de muestreo:

La eficiencia del sistema de mitigación conformado por el tamiz rotatorio (trommel) y la celda de flotación proporciona los siguientes valores mostrados a continuación: se recupera

el 22,44% de los sólidos totales, y el 57,62% de la grasa.

Los estudios efectuados difieren de los presentados por la CONAM- USAID (2000) debido a que no aplicaron la metodología de trabajo basado, fundamentalmente, en el principio de conservación de la materia, lo cual nos permite contrastar, metodológicamente, el trabajo de ellos.

Referencias

- Ayala, J. & Pardo, M. (1995). *Optimización por diseños experimentales*. Perú: CONCYTEC.
- CONAM-USAID (2000). *Prácticas recomendadas para mejorar la eficiencia de los procesos en la industria de harina de pescado - guía técnica*. Perú: Ministerio de Pesquería.
- Czysz, W. (1990). *Manual de disposición de aguas residuales*. Perú: CEPIS.
- Di Bernardo, L. (1993). *Métodos y técnicas de tratamiento de agua*. Volumen II. Rio de Janeiro: ABES.
- Grados, L. (1996). *El análisis de Riesgo y Punto de Control Crítico (HACCP) y su aplicación práctica en la Industria de Harina de pescado*. Perú: Colegio de Ingenieros.
- Himmelblau M. D. (1994). *Balance de Materia y Energía*. México: Ed. Reverté.
- Hinojosa I. & Barrera, H. (1998). *Contaminación marina*. Revista Pesquera Internacional Mar Peruano. 2(4):32-33. Lima - Perú.
- Landeo, O. & Ruiz, A. (1992). *Producción de harina y aceite de pescado*. Perú: Universidad Nacional San Luis Gonzaga de Ica, Facultad de Pesquería, Pisco - Ica.
- Martínez, A. & Aldave, G. (1998). *El agua de bombeo*. Revista Pesquera Internacional Mar Peruano. 2(4):36-37.
- Quezada, L. (2010). *Estadística para ingenieros*. Lima-Perú: Empresa Editora Macro.