

PROPUESTA TÉCNICO-ECONÓMICA PARA MEJORAR LA PRODUCCIÓN Y COMERCIALIZACIÓN DEL BIOPLAGUICIDAS *Bacillus thuringiensis* DE LA PLANTA DE BIOPREPARADOS DE MATANZAS

Lourdes Y. González Sáez, Yaima Alonso Pedroso, Arley Pérez Rojas
Centro de Estudios de Medio Ambiente de Matanzas, Facultad de Ingenierías Química y Mecánica, Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”

*En esta investigación se valoran alternativas técnico-económica que faciliten la comercialización del bioplaguicidas *Bacillus thuringiensis*, que se obtiene en la Planta de biopreparados en la Provincia de Matanzas. Se selecciona la sedimentación, filtración y centrifugación como mecanismos de separaciones mecánica para la eliminación del contenido de agua con que se produce el *Bacillus Thuringiensis*. Para seleccionar el mecanismo más adecuado se aplican métodos heurísticos dirigidos al análisis operacional y económico de las operaciones. El análisis operacional incluye la caracterización del producto y una optimización del proceso de separación en el cual se define la materia prima más adecuada para la producción del bioplaguicida y la influencia de los parámetros estudiados en la calidad del producto y en la separación de fases. El análisis económico permite complementar los resultados del análisis técnico al definir a la sedimentación como alternativa factible luego de obtener un Valor Actual Neto (VAN) positivo para esta operación, contrariamente a los obtenidos con los restantes mecanismos estudiados.*

Palabras clave: bioplaguicidas, filtración, sedimentación, centrifugación, *Bacillus thuringiensis*.

*In this investigation techno - economic alternatives that facilitate the commercialization of the *Bacillus thuringiensis* pesticide are valued, that is obtained in the biochemical Plant in Matanzas. One selects the sedimentation, filtration and centrifugation as mechanical separations mechanisms for the elimination the water content whereupon the *Bacillus thuringiensis* takes place. In order to select the most suitable mechanism heuristic methods directed are applied to the operational and economic analysis of the operations. The operational analysis includes the characterization of the product and an optimization of the separation process in which the more suitable raw material for the production of the pesticide and the influence of the parameters studied in the quality of the product and the separation of phases is defined. The economic analysis allows to complement the results of the technical analysis when defining to the feasible alternative sedimentation after obtaining a positive Net Present Value (NPV) for this operation, contrary to the obtained ones with the remaining studied mechanisms.*

Key words: pesticide, filtration, sedimentation, centrifugation, *Bacillus thuringiensis*.

Introducción

En la agricultura cubana se están produciendo profundas transformaciones en busca de la sostenibilidad, que conduce a la seguridad alimentaria, la calidad ambiental y el desarrollo rural local. En lo que respecta a la sanidad vegetal estos cambios representan un ejemplo notable del apoyo estatal en gran escala al manejo ecológico de plagas y han generado experiencias llenas de lecciones útiles en muchos escenarios del campo cubano y de otros países. /11/

El uso indiscriminado de plaguicidas es la causa directa de la aparición del fenómeno de la

resistencia de diferentes organismos, y por consiguiente de la pérdida de su efectividad. Ante esta situación, es común que los agricultores aumenten la dosis y preparen mezclas de varios plaguicidas, con frecuencia más tóxicos, por lo que el problema de la resistencia, lejos de solucionarse, se agrava. /6/, /5/

Desde principios de los años 60 del siglo pasado, los productos químicos que se aplican en los sistemas agrícolas industriales no solo han contaminado las fuentes de agua y deteriorado la fertilidad de los suelos, sino también han afectado la fauna y la salud humana. Para evitar el uso de plaguicidas químicos lo primero es establecer

prácticas de manejo preventivo de plagas, dentro de esta se encuentra la agricultura orgánica.

La agricultura orgánica se trata de un sistema de producción basado en la gestión del ecosistema en vez de la utilización de insumos, como fertilizantes y plaguicidas sintéticos (químicos) /4/.

Los programas de investigación sobre los sistemas de cultivos orgánicos fueron muy limitados hasta comienzo de los años 80 del siglo pasado /9, 10/. Es a partir de esa década que aumenta la presión pública en cuanto a la conservación de los recursos naturales y la protección del medio ambiente, crece también la preocupación por los riesgos que para la salud humana implica el uso de plaguicidas químicos – sintéticos y los fertilizantes inorgánicos. Estas presiones y preocupaciones se incrementaron aún más en lo años 90.

Para evitar el uso de plaguicidas químicos se hace necesario desarrollar métodos de manejo de plagas compatibles con el medio ambiente, uno de éstos es el control biológico, en el cual la población de una especie baja el número de otra especie por mecanismos tales como la depredación, parasitismo, patogenicidad ó competencia.

En Cuba uno de los aspectos más importantes en el manejo de plagas es la producción artesanal de microorganismos para el control biológico. La producción masiva de entomopatógenos permite disponer de cantidades apreciables de agentes de control biológico. El primer entomopatógeno utilizado en Cuba para el manejo de plagas en condiciones de campo fue el *Bacillus thuringiensis*. /3/, /12/

El *Bacillus thuringiensis* es el entomopatógeno que mayor uso tiene y el que más se ha producido. El *Bacillus thuringiensis* se produce actualmente en 114 Centros Reproductores de Entomófagos y Entomopatógenos (CREE). Aproximadamente el 90 % de las ventas de agentes de control microbiano corresponden a productos que tienen como base esta bacteria. La experiencia práctica de la planta de biopreparado de Matanzas ha demostrado que el alto contenido de agua con que se obtiene este bioplaguicida dificulta las ventas por problemas de almacenamiento, transportación y manipulación. /3/

Para seleccionar sistemas u operaciones de separaciones mecánicas que permitan solucionar dicho problema pueden aplicarse métodos heurísticos o algorítmicos. Ambos enfoques pudieran combinarse en un problema en particular para buscar un compromiso entre el espacio de búsqueda y un resultado óptimo o cercano al óptimo.

Las reglas heurísticas se basan en la experiencia que se ha adquirido sobre la operación y diseño del proceso existente. JIMÉNEZ, A /8/ reporta algunas reglas heurísticas para procesos de separación las cuales deben tenerse en cuenta. Dentro de estas reglas se encuentran:

- 1 Elegir el método de separación primero. Lo primero que se tiene en cuenta ante la necesidad de separar una mezcla es la selección de la operación unitaria que conviene utilizar para separarla.
- 2 Cuando sea posible, reducir la carga de separación: El objetivo básico de esta regla es disminuir los costos de energía del proceso de separación.

Si bien existen diferentes mecanismos que permiten separar suspensiones, en la industria de los bioplaguicidas son la sedimentación, filtración o centrifugación, según la experiencia y bibliografía especializada, los procesos unitarios que permiten separar y/o titular este tipo de suspensiones. Se analizan cada una como alternativas de mecanismos de separación.

Materiales y métodos

Se estudiaron las operaciones de sedimentación, filtración y centrifugación como mecanismo de separaciones mecánica posible a utilizar en la experimentación, con el objetivo de determinar la factibilidad de seleccionar y proponer la más adecuada técnica y económicamente para la titulación o concentración del *Bacillus thuringiensis* que se produce en la planta de biopreparados de Matanzas.

La selección de la materia prima en la producción del *Bacillus thuringiensis* se realiza en función de variar la fuente nitrógeno/carbono, considerando la variabilidad en la producción de la

cepa LBT-24 del *Bacillus Thuringiensis*. Se emplearon como fuente de nitrógeno: Levadura Torula (T) y Soya (S), y como fuente de carbono Maicena (M) y Harina de maíz (H). De esta forma se obtuvieron las combinaciones T/M; T/H y S/M.

El control de la calidad del producto durante y al culminar el proceso de obtención se realiza según la Norma estatal para el control de la calidad de productos de *Bacillus thuringiensis* /2/. Esta norma establece como parámetros de calidad a la: viabilidad, concentración de unidades formadoras de colonia UFC (esporas), relación espora/cristal, virulencia y pureza.

En cada mecanismo estudiado se caracterizaron los productos de la cepa producida y

seleccionada según las diferentes materias primas utilizadas en el proceso de obtención del *Bacillus thuringiensis* (LBT-24), así como las fases resultantes de las tres operaciones unitarias.

Para el diseño de experimento de cada mecanismo se empleó un diseño factorial completo a tres niveles (3²), para lo cual se definieron en cada mecanismo los factores a investigar (X₁; X₂) y las variables respuesta (Y_i). Este diseño permite analizar estadísticamente como influyen los factores investigados (X₁; X₂) sobre las variables respuesta en la región experimental de cada proceso, al ajustarse a un modelo de segundo orden del tipo,

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{12}X_1X_2 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2, \quad (1)$$

lo que permitió optimizar las condiciones experimentales. En la tabla 1 se reflejan los factores a investigar, sus niveles y las variables respuesta en cada mecanismo.

La optimización de las condiciones operacionales de cada mecanismo se realizó

con el Solver del programa *Microsoft Excel*. Todas las pruebas experimentales y las determinaciones microbiológicas, analíticas y operacionales se han realizado por triplicado bajo condiciones idénticas, asimismo el resultado para cada muestra es obtenido a partir de tres réplicas de cada una de ellas.

Tabla 1
Factores a investigar y variables respuesta en cada mecanismo

	Factores	Niveles	Variables respuestas
Sedimentación	Dosis de floculante (D)	2,5 g	Y _{1s} - Viabilidad.
		5 g	Y _{2s} - concentración de UFC
		7,5 g	Y _{3s} - relación espora/cristal
	Materia Prima (MP)	T/H	Y _{4s} - pH
		T/M	Y _{5s} - concentración de sólidos totales en la torta
		S/M	Y _{6s} - eficiencia de la operación
			Y _{7s} -velocidad máxima de sedimentación
Filtración	Caída de Presión (ΔP)	150 kgf/cm ²	Y _{1f} - Viabilidad.
		200 kgf/cm ²	Y _{2f} - concentración de UFC
		250 kgf/cm ²	Y _{3f} - relación espora/cristal
	Materia Prima (MP)	T/H	Y _{4f} - pH
		T/M	Y _{5f} - concentración de sólidos totales en la torta
		S/M	Y _{6f} - eficiencia de la operación
			Y _{7f} -tiempo de filtrado
Centrifugación	Velocidad de rotación (n)	2 000 rpm	Y _{1c} - Viabilidad.
		3 000 rpm	Y _{2c} - concentración de UFC
		4 000 rpm	Y _{3c} - relación espora/cristal
	Materia Prima (MP)	T/H	Y _{4c} - pH
		T/M	Y _{5c} - concentración de sólidos totales en la torta
		S/M	Y _{6c} - eficiencia de la operación

Selección de la operación

Para la toma de decisiones en cuanto a selección de la operación unitaria factible se combinan métodos heurísticos y algorítmicos en la búsqueda de un resultado óptimo.

Se realiza un análisis técnico-operacional de alternativas donde se analizan y comparan los óptimos en la región experimental y se determina la incidencia en las variables respuestas en cada operación. En el análisis se incluyen tanto los parámetros de calidad del producto final, como la eficiencia de cada mecanismo.

Además se desarrolla un análisis económico de alternativas para el cual se utilizaron los

métodos dinámicos Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Rendimiento (TIR) ó tasa interna de retorno.

El análisis técnico-económico permite seleccionar la alternativa factible, teniendo en cuenta, como criterio de selección, que el mecanismo de separación adecuado será aquel que satisfaga los requerimientos de conservación de calidad del producto y que a su vez sea el más económico posible.

Resultados y discusión

En las tablas 2, 3 y 4 se representan las condiciones experimentales correspondientes al diseño experimental de los mecanismos de sedimentación, filtración y centrifugación respectivamente.

Tabla 2
Matriz del diseño experimental de sedimentación

		MP	D (g)	V (%)	C (UFC/mL)	R	pH	ST (mg/L)	ξ (%)	v_s (cm/h)	P (%)	
No. Exp	Corridas	X_1	X_2	Y_{1r}	Y_{2r}	Y_{3r}	Y_{4r}	Y_{5r}	Y_{6r}	Y_{7r}	-	
1	2	S/M (-1)	2,5	<u>97,5</u>	2,4 E+09	0,8	<u>4,5</u>	15000	46,7	12,4	100	
2	10	T/H (0)	2,5	97	4,15 E+09	<u>0,85</u>	4,25	28000	64,3	0,1271	100	
3	6	T/M (-1)	2,5	<u>97,5</u>	3,5E+09	0,75	4,15	27000	55,6	0,05	100	
4	3	S/M (-1)	5	96,5	1,45 E+09	0,7	3,8	14000	42,9	12,4	100	
5	11	T/H (0)	5	96	2,95 E+09	0,75	3,95	28000	64,3	0,1309	100	
6	7	T/M (-1)	5	<u>97,5</u>	2,8 E+09	0,6	3,65	26000	53,8	0,066	100	
7	4	S/M (-1)	7,5	96	1,8 E+09	0,65	3,6	26500	69,8	<u>12,5</u>	100	
8	12	T/H (0)	7,5	95	<u>4,3 E+09</u>	0,75	3,5	36000	<u>72,2</u>	0,1527	100	
9	8	T/M (-1)	7,5	97	2,65 E+09	0,7	3,4	<u>40000</u>	70,0	0,09	100	
Patron (LBT-24)	10	1	S/M (-1)	0	97,5	2,1 E+09	0,55	5	12 000	33,3	<u>12,5</u>	100
	11	5	T/H (0)	0	95,5	<u>3,95 E+09</u>	<u>0,77</u>	4,55	<u>24 000</u>	<u>58,3</u>	0,0022	100
	12	9	T/M (-1)	0	<u>98</u>	3,5 E+09	0,65	<u>4,8</u>	17 500	31,4	0,0272	100
R^2	-	-	-	93,06	96,36	92,07	96,6	98,13	91,89	99,99	-	
P-value	-	-	-	0,041	0,0127	0,038	0,004	0,0021	0,018	0,015	-	

Tabla 3
Matriz del diseño experimental de Filtración

		MP	ΔPr (kgf/cm^2)	V (%)	C (cmL)	R	pH	ST (mg/L)	ξ (%)	ω (h)	P (%)
No.	Comidas	X_1	X_2	Y_{1f}	Y_{2f}	Y_{3f}	Y_{4f}	Y_{5f}	Y_{6f}	Y_{7f}	-
1	4	S/M (-1)	50	97	2,5 E+9	0,65	4,75	40000	80,0	1	100
2	7	T/H (0)	50	97,5	3,8 E+9	0,75	4,55	48000	79,2	25	100
3	1	T/M (-1)	50	97	2,3 E+9	0,7	4,7	36000	66,7	<u>30</u>	100
4	5	S/M (-1)	150	97,5	2,35 E+9	0,8	4,75	40000	80,0	1	100
5	8	T/H (0)	150	97,5	3,5 E+9	<u>0,85</u>	4,45	51000	80,4	15	100
6	2	T/M (-1)	150	97	2,45 E+9	0,75	4,6	42000	71,4	<u>30</u>	100

MP – Materia Prima (X_1); ΔPr – dosis de floculante (X_2); V - viabilidad (Y_{1f}); C – Concentración de UFC (Y_{2f}); R – Relación espora/cristal (Y_{3f}); pH – (Y_{4f}); ST- Sólidos Totales (Y_{5f}); ξ - eficiencia de la operación (Y_{6f}); ω 0 – velocidad máxima de sedimentación (Y_{7f}); P- Pureza; R^2 - coeficiente de determinación del modelo; P-value - valor de probabilidad de ajuste del modelo.

Tabla 4
Matriz del diseño experimental de centrifugación

		MP	n (rpm)	V (%)	C (cmL)	R	pH	ST (mg/L)	ξ (%)	P (%)
No. Exp	Comida	X_1	X_2	Y_{1c}	Y_{2c}	Y_{3c}	Y_{4c}	Y_{5c}	Y_{6c}	-
1	4	S/M (-1)	2000	96	1,5E+09	0,75	4,8	47500	83,2	100
2	7	T/H (0)	2000	<u>97,5</u>	3,6E+09	0,8	4,6	54000	81,5	100
3	1	T/M (-1)	2000	95	1,9E+09	0,7	4,7	49000	75,5	100
4	5	S/M (-1)	3000	96	2,2E+09	0,85	<u>4,85</u>	57000	86,0	100
5	8	T/H (0)	3000	97	4,1E+09	0,85	4,65	68000	85,3	100
6	2	T/M (-1)	3000	95	2,1E+09	0,8	4,8	46000	73,9	100
7	6	S/M (-1)	4000	96,5	2,9E+09	0,85	4,75	68750	<u>88,4</u>	100
8	9	T/H (0)	4000	<u>97,5</u>	<u>5,5E+09</u>	<u>0,9</u>	4,7	<u>70000</u>	85,7	100
9	3	T/M (-1)	4000	95,5	2,9E+09	0,8	<u>4,85</u>	57500	79,1	100
R^2	-	-	-	98,53	98,08	96,15	95,54	92	95,4	-
P-value	-	-	-	0,003	0,014	0,005	0,045	0,01	0,046	-

MP – Materia Prima (X_1); r – velocidad de rotación (X_2); V - viabilidad (Y_{1c}); C – Concentración de UFC (Y_{2c}); R – Relación espora/cristal (Y_{3c}); pH – (Y_{4c}); ST- Sólidos Totales (Y_{5c}); ξ eficiencia de la operación (Y_{6c}); P- Pureza; R^2 - coeficiente de determinación del modelo; P-value - valor de probabilidad de ajuste del modelo.

Las ecuaciones de 2 a la 21 exponen los modelos obtenidos en cada operación para cada variable respuesta, representados por

ecuaciones de segundo orden donde se involucran los factores investigados (X_1 y X_2) y sus interacciones.

Sedimentación

$$Y_{1s} = 97,3333 - 0,166667X_1 - 0,266667X_2 + 1,0X_1^2 + 0,1X_1X_2 - 0,0X_2^2 \quad (2)$$

$$Y_{2s} = 5,85556E9 + 6,41667E8X_1 - 7,1X_2 - 1,70833E9X_1^2 - 2E7X_1X_2 + 6,26667E7X_2^2 \quad (3)$$

$$Y_{3s} = 1,10556 - 0,0666667X_1 - 0,126667X_2 - 0,0833333X_1^2 + 0,01X_1X_2 + 0,0106667X_2^2 \quad (4)$$

$$Y_{4s} = 5,03333 - 0,191667X_1 - 0,32X_2 + 0,05X_1^2 + 0,015X_1X_2 + 0,016X_2^2 \quad (5)$$

$$Y_{5s} = 40111,1 + 5500,0X_1 - 7566,67X_2 - 5916,67X_1^2 + 150,0X_1X_2 + 973,333X_2^2 \quad (6)$$

$$Y_{6s} = 83,2444 + 7,68333X_1 - 12,0667X_2 - 10,4667X_1^2 - 0,87X_1X_2 + 1,50933X_2^2 \quad (7)$$

$$Y_{7s} = 0,1517 - 6,15233X_1 - 0,02256X_2 + 6,1141X_1^2 - 0,006X_1X_2 + 0,00336X_2^2 \quad (8)$$

Filtración

$$Y_{1f} = 98,3125 - 0,791667X_1 - 0,02X_2 - 1,25X_1^2 + 0,0025X_1X_2 + 0,000075X_2^2 \quad (9)$$

$$Y_{2f} = 4,21875E9 - 3,95833E7X_1 - 9,5E9X_2 - 1,475E9X_1^2 - 125000X_1X_2 + 42500X_2^2 \quad (10)$$

$$Y_{3f} = 0,661111 + 0,05X_1 + 0,00233333X_2 - 0,0916667X_1^2 - 0,0005X_1X_2 - 0,00000666667X_2^2 \quad (11)$$

$$Y_{4f} = 4,60417 - 0,0104167X_1 - 0,001666667X_2 + 0,2X_1^2 - 0,000375X_1X_2 + 0,000005X_2^2 \quad (12)$$

$$Y_{5f} = 51506,9 - 4020,83X_1 - 51,6667X_2 - 12916,7X_1^2 + 36,25X_1X_2 + 0,408333X_2^2 \quad (13)$$

$$Y_{6f} = 78,7861 - 7,84583X_1 - 0,005X_2 - 5,31667X_1^2 + 0,02375X_1X_2 + 0,000123333X_2^2 \quad (14)$$

$$Y_{7f} = 21,6667 + 15,5417X_1 - 0,0333333X_2 - 2,0X_1^2 - 0,0125X_1X_2 + 0,0X_2^2 \quad (15)$$

Centrifugación

$$Y_{1c} = 99,6111 - 0,5X_1 - 0,00183333X_2 - 1,66667X_1^2 + 0,0X_1X_2 + 3,33333E-7X_2^2 \quad (16)$$

$$Y_{2c} = 4,28889E9 + 3,79167E8X_1 - 741667,0X_2 - 2,15833E9X_1^2 - 112500,0X_1X_2 + 241,667X_2^2 \quad (17)$$

$$Y_{3c} = 0,422222 - 0,025X_1 + 0,00025X_2 - 0,0583333X_1^2 + 0,0X_1X_2 - 3,33333E-8X_2^2 \quad (18)$$

$$Y_{4c} = 4,27222 - 0,158333X_1 + 0,000233333X_2 + 0,141667X_1^2 + 0,00005X_1X_2 - 3,33333E-8X_2^2 \quad (19)$$

$$Y_{5c} = 47722,2 + 6104,17X_1 + 2,875X_2 - 9708,33X_1^2 - 3,1875X_1X_2 + 0,000791667X_2^2 \quad (20)$$

$$Y_{6c} = 81,8333 - 3,65X_1 - 0,000833333X_2 - 3,15X_1^2 - 0,0004X_1X_2 + 5E-7X_2^2 \quad (21)$$

Como se observa (tabla 2, 3 y 4) todos los modelos se ajustan adecuadamente a los valores experimentales al obtenerse en cada uno valores de coeficiente de correlación (R2) mayores a 90 %. Valores de probabilidad (P-value) menores a 0,05 en todos los casos indican buena calidad de ajuste para todos los modelos.

Al intentar optimizar todas las variables respuesta de cada mecanismo bajo las mismas condiciones experimentales se dificulta el análisis, pues el efecto de los factores (X_1 y X_2) es diferente en el comportamiento de cada una de

ellas. Es por esta razón que se optimiza el sistema global a partir de una función de *deseabilidad*. El objetivo de la optimización de la operación es determinar las condiciones experimentales óptimas requeridas para obtener un producto apropiado. Esta función multiobjetivo, optimiza la suma de todos los modelos de las variables respuestas (Y_{ij}) codificadas /1/, /7/. El que supone su óptimo sobre el óptimo global del sistema. El peso de cada variable de acuerdo a la importancia de cada una sobre el máximo global del sistema (F_i) fue reportado por expertos, basa-

do en la experiencia profesional. La función que permite obtener los valores de deseabilidad para el ajuste de la función objetivo que optimiza el proceso de forma global es la siguiente:

$$D_j = \sum_{i=1}^v F_i Y_{ij} \quad \text{para } j = 1, 2, \dots, x \quad (22)$$

donde: x representa los resultados experimentales de cada variable y v las variables respuesta.

Como la dependencia de las variables respuestas con los factores difiere con la X_1 y X_2 en todos los mecanismos, es necesario definir el criterio de optimización de cada variable en función del comportamiento (tabla 5).

Tabla 5
Criterio de optimización de las variables respuestas

Variables respuesta	Criterio de optimización		
	Sedimentación	Filtración	Centrifugación
Y_1	maximizar (+)	maximizar (+)	maximizar (+)
Y_2	maximizar (+)	maximizar (+)	maximizar (+)
Y_3	maximizar (+)	maximizar (+)	maximizar (+)
Y_4	maximizar (+)	maximizar (+)	maximizar (+)
Y_5	maximizar (+)	maximizar (+)	maximizar (+)
Y_6	maximizar (+)	maximizar (+)	maximizar (+)
Y_7	maximizar (+)	minimizar (-)	-

Los modelos que mejor ajustan los datos experimentales a la función de deseabilidad de cada mecanismo son los siguientes:

Sedimentación:

$$D_s = 112,096278 \cdot 9 + 0,276 X_1 - 14,263 X_2 - 12,225 X_1^2 - 0,49862 X_1 X_2 + 1,669424 X_2^2 \quad (23)$$

Filtración

$$D_f = 62,7205161 \cdot 5 - 0,937 X_1 - 0,003 X_2 - 6,450 X_1^2 + 0,005663 X_1 X_2 + 9,06e - 5 X_2^2 \quad (24)$$

Centrifugación

$$D_c = 38,9147568 \cdot 1 + 0,321072218 X_1 + 0,002 X_2 - 4,567 X_1^2 - 0,001 X_1 X_2 - 8,85E - 08 X_2^2 \quad (25)$$

La optimización (tabla 6) de la función de deseabilidad válida en la región experimental de

cada proceso muestra los valores de los factores que la maximizan.

Tabla 6
Óptimos en la región experimental de cada mecanismo

	Factores	Óptimo
Sedimentación	Dosis de floculante (D)	7.5 g
	Materia Prima (MP)	T/H
Filtración	Caída de Presión (ΔP)	250 kgf/cm ²
	Materia Prima (MP)	T/H
Centrifugación	Velocidad de rotación (n)	4 000 rpm
	Materia Prima (MP)	T/H

Selección de alternativa. Análisis técnico de alternativas

Al estudiar cada mecanismo así como la dependencia de sus parámetros característicos y la materia prima en la variable respuesta se obtuvo un óptimo en la región experimental para cada uno. Como se muestra (tabla 6) la materia prima óptima es la T/H en todos los casos, lo que es indicativo que es esta la de mejores características funcionales y la que aporta mayores nutrientes en el proceso productivo para que estimulen la esporulación, crecimiento y formación de cristales. En la figura 1 se observa como la separación de fases aplicando diferentes operaciones influye en las características del producto luego de ser procesado. El comportamiento es idéntico en todas las variables observándose un aumento en la centrifugación con respecto a la filtración y sedimentación respectivamente, a pesar de que en la variable viabilidad hay disminución poco representativa en la centrifugación con respecto a la filtración.

El aumento de la viabilidad, concentración de UFC, relación spora/cristal, eficiencia y sólidos totales se debe a que en centrifugación la fuerza impulsora de separación (fuerza centrífuga) es mayor que la de

filtración (diferencia de presión) y la de sedimentación (fuerza de gravedad). Si se parte que en el movimiento de una partícula en el seno de un fluido o el flujo a través de sólidos porosos están involucradas las fuerza de arrastre y de fricción, las fuerzas impulsoras de estos mecanismo hacen que se venzan las resistencias al movimiento del sólido o del fluido, según sea el caso, y por tanto la aglomeración será mayor. La variación de pH entre valores extremos de 3,5 a 4,7 para sedimentación y centrifugación respectivamente demuestran que ninguno de estos mecanismos influyen en el pH del medio pues la diferencia es de apenas 1,2 unidades dado fundamentalmente por el comportamiento de esta variable en sedimentación. Obsérvese que la diferencia entre el pH de filtración y centrifugación es de apenas 0,2 unidades lo que confirma lo expuesto.

No obstante a este comportamiento lógico de aumento de la variable respuesta puede decirse que, en todos los casos, las relacionadas con los parámetros de calidad cumplen con la norma de calidad del producto, obteniéndose viabilidad entre 95% y 98% concentración de UFC entre $4,3 \cdot 10^9$ y $5,5 \cdot 10^9$ UFC/mL y la relación spora/cristal oscila entre 0,75 y 0,9. Esto permite concluir que todos los mecanismos satisfacen los requerimientos técnicos y de calidad del producto. Variaciones en la eficiencia entre 72,2 % y 85,7 % corroboran lo planteado anteriormente.

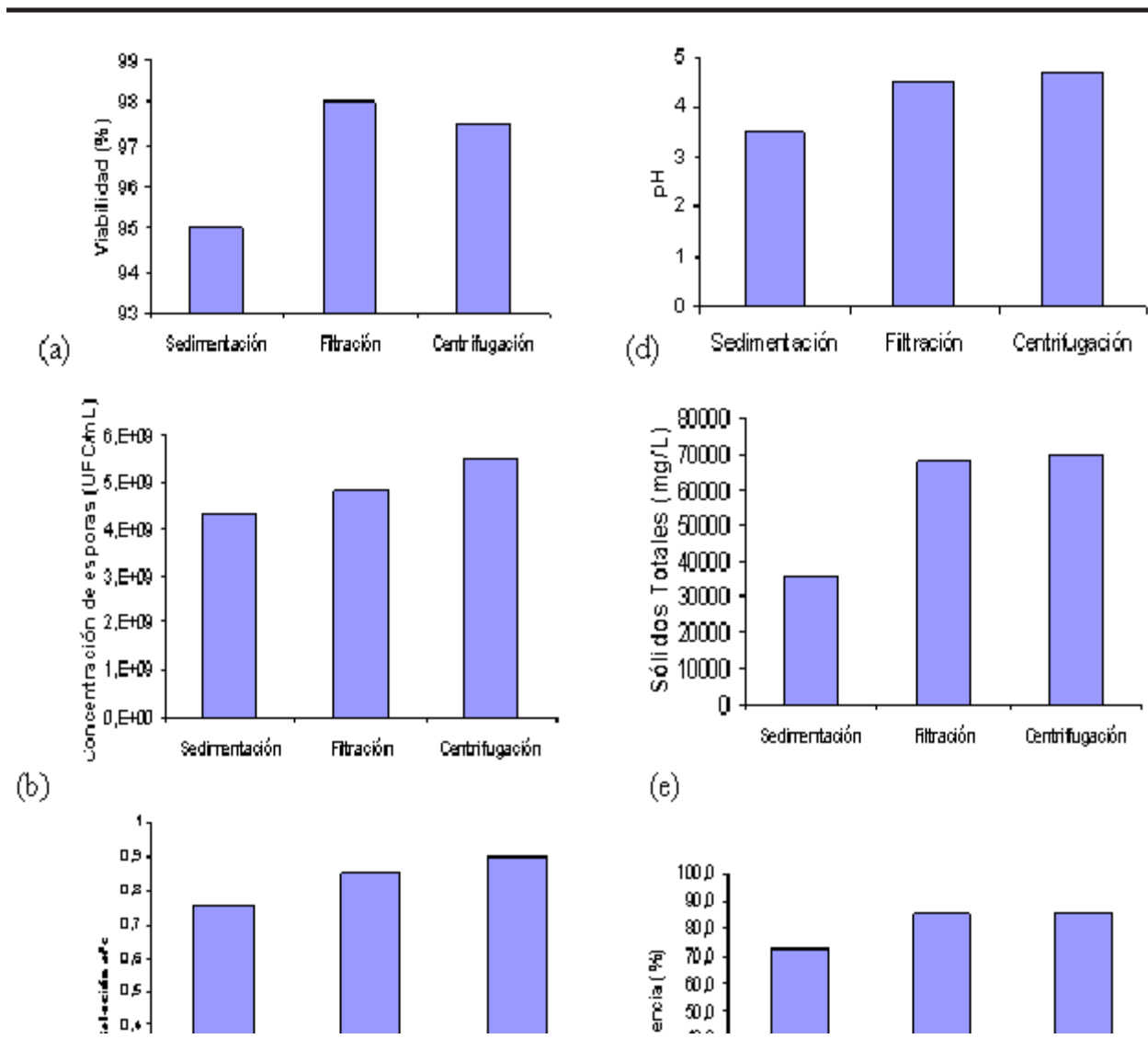


Fig. 1 Comportamiento de las variables respuesta con los mecanismos de separación. (a)- Viabilidad, (b)- Concentración de UFC, (c)- Relación espora/cristal, (d)- pH, (e)- Sólidos totales, (f)- Eficiencia.

Análisis económico de alternativas

Luego de definir que las tres operaciones cumplen con los requerimientos técnico operacional para obtener un producto de calidad, independientemente de que existen variaciones en los parámetros dadas por las características y peculiaridades de la operación, es imprescindible la búsqueda de otros criterios que permitan la selección del mecanismo. Para ello

se aplica la segunda regla de las Heurísticas de procesos de separaciones que plantea que debe seleccionarse aquella opción que favorezca la disminución de los costos, y por tanto, que sea económicamente factible. Para ello se calcula el Valor Actual Neto de cada alternativa como criterio de factibilidad económica.

Los resultados obtenidos del movimiento de flujo de caja de cada mecanismo se reportan en las tablas 7, 8 y 9.

Tabla 7
Movimiento del flujo de fondo. Sedimentación

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Inversión	104421,83										
CI	295070,73	295070,73	295070,73	295070,73	295070,73	295070,73	295070,73	295070,73	295070,73	295070,73	295070,73
Cv	797965,68	797965,68	825064,97	852164,27	852164,27	852164,27	852164,27	852164,27	852164,27	852164,27	852164,27
Total Pagos	104421,83	1.095.036,41	1.120.135,70	1.147.235,00	1.147.235,00	1.147.235,00	1.147.235,00	1.147.235,00	1.147.235,00	1.147.235,00	1.147.235,00
Total Cobros	0,00	1.092.000,00	1.228.500,00	1.365.000,00	1.365.000,00	1.365.000,00	1.365.000,00	1.365.000,00	1.365.000,00	1.365.000,00	1.365.000,00
Mov Fondos	-104.421,83	-1.036,41	108364,30	217765,00	217765,00	217765,00	217765,00	217765,00	217765,00	217765,00	217765,00
Mov Fondos Acumulados	-104.421,83	-105.458,25	2.906,06	220.671,07	438436,07	656201,07	873966,07	1.091.731,07	1.309.496,07	1.527.261,07	1.745.026,08
Mov Fondos Actualizados	-104.421,83	-925,36	86.387,35	155.000,83	138.393,60	123.565,71	110.326,53	98.205,83	87.951,65	78.528,24	70.114,20
VAN (\$)	773312,53										
TIR (%)	66										

Tabla 8
Movimiento del flujo de fondo. Filtración

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Inversión	200283,25										
CI	295070,73	614434,52	614434,52	614434,52	614434,52	614434,52	614434,52	614434,52	614434,52	614434,52	614434,52
Cv	200283,25	1.534.611,66	1.654.549,27	1.774.486,89	1.774.486,89	1.774.486,89	1.774.486,89	1.774.486,89	1.774.486,89	1.774.486,89	1.774.486,89
Total Pagos	200283,25	2.149.046,17	2.269.983,79	2.388.921,41	2.388.921,41	2.388.921,41	2.388.921,41	2.388.921,41	2.388.921,41	2.388.921,41	2.388.921,41
Total Cobros	0,00	1.092.000,00	1.228.500,00	1.365.000,00	1.365.000,00	1.365.000,00	1.365.000,00	1.365.000,00	1.365.000,00	1.365.000,00	1.365.000,00
Mov Fondos	-200.283,25	-1.057.046,17	-1.040.483,79	-1.025.921,41	-1.025.921,41	-1.025.921,41	-1.025.921,41	-1.025.921,41	-1.025.921,41	-1.025.921,41	-1.025.921,41
Mov Fondos Acumulados	-200.283,25	-1.257.329,42	-2.297.813,21	-3.321.734,62	-4.345.656,03	-5.369.577,45	-6.393.498,86	-7.417.420,27	-8.441.341,68	-9.465.263,09	-10.489.184,50
Mov Fondos Actualizados	-200.283,25	-943.791,23	-829.467,31	-726.807,04	-630.720,57	-581.000,51	-518.750,45	-463.170,05	-413.544,68	-369.236,33	-329.675,29
VAN (\$)	-6.026.446,69										

Tabla 9
Movimiento del flujo de fondo. Centrifugación

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Inversión.	200.288,25										
Cf	29.570,73	614.434,52	614.434,52	614.434,52	614.434,52	614.434,52	614.434,52	614.434,52	614.434,52	614.434,52	614.434,52
Cv		1.524.611,66	1.654.549,27	1.774.486,89	1.774.486,89	1.774.486,89	1.774.486,89	1.774.486,89	1.774.486,89	1.774.486,89	1.774.486,89
Total Pagos	200.288,25	2.149.046,17	2.268.988,79	2.388.921,41	2.388.921,41	2.388.921,41	2.388.921,41	2.388.921,41	2.388.921,41	2.388.921,41	2.388.921,41
Total Cobros	0,00	1.092.000,00	1.228.500,00	1.365.000,00	1.365.000,00	1.365.000,00	1.365.000,00	1.365.000,00	1.365.000,00	1.365.000,00	1.365.000,00
Mov Fondos	-200.288,25	-1.057.046,17	-1.040.488,79	-1.023.921,41	-1.023.921,41	-1.023.921,41	-1.023.921,41	-1.023.921,41	-1.023.921,41	-1.023.921,41	-1.023.921,41
Mov Fondos Acumulados	-200.288,25	-1.257.339,42	-2.297.813,21	-3.321.734,62	-4.345.656,03	-5.369.577,45	-6.393.498,86	-7.417.420,27	-8.441.341,68	-9.465.263,09	-10.489.184,50
Mov Fondos Acumulados	-200.288,25	-943.791,23	-829.467,31	-728.807,04	-630.720,57	-531.000,51	-431.730,45	-332.170,05	-232.544,68	-132.929,33	-32.675,29
VAN (\$)	-6.028.446,69										

Como puede observarse, los resultados obtenidos del movimiento de flujo de caja en cada mecanismo arrojan un VAN positivo de 773 312,53\$ y una TIR de 66 % para el sedimentador, no siendo así para el filtro y la centrífuga donde no existe una TIR que garantice un VAN positivo y este es negativo. Si se tiene en cuenta que son efectuables aquellas inversiones que tengan un VAN positivo, siendo más interesante cuanto mayor sea este, la única alternativa factible económicamente es precisamente el sedimentador. Esta alternativa garantiza que se obtenga un producto de calidad al menor costo posible.

Conclusiones

Los resultados obtenidos permiten concluir que la aplicación de los mecanismos de sedimentación, filtración y centrifugación permiten separar el contenido de sólidos y eliminar una fracción importante del contenido de agua del bioplaguicida *Bacillus thuringiensis* que se produce en la Planta de biopreparados de Matanzas. Si bien todas las materias primas estudiadas favorecen en gran medida el crecimiento, la esporulación y la formación de cristales tóxicos, el uso de la Levadura *Torula* como fuente de nitrógeno y la harina de maíz como fuente de carbono proporcionan una mayor cantidad de nutrientes en el proceso fermentativo, obteniéndose un producto (*Bacillus thuringiensis*) de mejor calidad. Estas características hacen que sea el producto con *Torula*/Harina el óptimo obtenido en los mecanismos de separación. Aunque el análisis técnico operacional arrojó que todos los mecanismos estudiados satisfacen los requerimientos de calidad del producto, la probada efectividad operacional y económica de la sedimentación con valores de eficiencia de la operación igual a 72,2 %, un producto final que cumple con los requerimientos de calidad y un VAN positivo de 773 312,53 \$ permiten seleccionarla como la más adecuada para ser aplicada para la titulación del *Bacillus thuringiensis* al finalizar el proceso productivo.

Bibliografía

1. BENÍTEZ, A.: Optimización de los parámetros de estabilización de procesos biológicos de depuración de aguas residuales a través de modelo de dinámica de sistema. Tesis (en opción al grado científico de Master en Control y Tratamiento de la Contaminación Ambiental), Universidad de Matanzas, Cuba, 2003
2. ELOZEGUI O.: Norma estatal para el control de la calidad de productos de *Bacillus Thuringiensis*. Instituto Nacional de Sanidad Vegetal, 10 p, 2002
3. ELOZEQUI, O.: Manual metodológico para la producción de Entomófagos y Entomopatógenos. 45 p, Cuba, 1991. [online] [consulta 15/2/2007]. Disponible en: <http://www.aguascalientes.gob.mx/codagea/produce/ElozequiBTMETODO.HTM/>.
4. FAO.: Que es la agricultura Orgánica. 2001, [online] [consulta: 2 marzo 2008] Disponible en: <http://www.fao.org/organicaag.default-s.htm/>.
5. GARCÍA, J.: Situación actual y perspectivas de la agricultura orgánica en Latinoamérica. (Costa Rica). 2002, [online] [consulta: 2 marzo 2008] Disponible en: <http://www.uaca.ac.cr/acta.html>.
6. GARCÍA, J. E.: "El mito del manejo seguro de los plaguicidas en los países en desarrollo", en Manejo integrado de plagas, Costa Rica, N° 52, 1999, p. 25-45.
7. GONZÁLEZ, L.: Elaboración de adsorbentes a partir de lodos de EDARS urbanas para la remoción de contaminantes orgánicos. 216 h. Universidad de Matanzas Tesis (en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas). Matanzas, Cuba, 2005.
8. JIMÉNEZ, A.: "Síntesis de Sistema de Separación", en Diseño de procesos de Ingeniería Química. Instituto Tecnológico de Celaya, México, Reverte,S.A, 2003, p 147-193.
9. PÉREZ, N.: Agricultura Orgánica: Bases para el manejo ecológico de plagas. CEDAR – ACTAF – HIVOS, 80p, La Habana, Cuba, 2003.
10. PÉREZ, N; et al.: "Manejo Ecológico de Plagas. Transformando el campo cubano: Avances de la agricultura Sostenible", en ACTAF – CEAS – Food First, La Habana, Cuba, 2001.
11. ROSSET, P; M. et al. : Introducción: Lecciones de la experiencia cubana. En: Transformando el campo cubano: Avances de la agricultura Sostenible. La Habana, Cuba, 2001.
12. VÁZQUEZ, L. et al.: Control biológico por concepto de los enemigos naturales en los programas de manejos de plagas introducidas. IV Seminario Científico de Sanidad Vegetal. Taller Plagas Emergentes. Matanzas, Cuba, 2001.

Nomenclaturas

CREE	Centros Reproductores de Entomófagos y Entomopatógenos
UFC	unidades formadoras de colonias (esporas)
LBT-24	Cepa de <i>Bacillus Thuringiensis</i>
T	Torula
S	Soya
M	Maicena
H	<i>Harina de maíz</i>
rpm	revoluciones por minuto
X	factores a investigar
Y_i	variables respuesta
D_1	dosis de floculante (2,5g)
D_2	dosis de floculante (5g)
D_3	dosis de floculante (7,5g)
X_2	<i>Materia Prima</i>
X_1	Factores del diseño experimental.
Y_{1E}, Y_{1R}, Y_{1C}	Viabilidad (%)
Y_{2E}, Y_{2R}, Y_{2F}	concentración de espora(UFC/ml)
Y_{3E}, Y_{3R}, Y_{3C}	relación espora/cristal
Y_{4E}, Y_{4R}, Y_{4C}	pH
Y_{5E}, Y_{5R}, Y_{5C}	concentración de sólidos totales en la torta(esporas/ml)
Y_{6E}, Y_{6R}, Y_{6C}	eficiencia de la operación (%)
Y_7	velocidad máxima de sedimentación. (cm/h)
Y_{7F}	tiempo de filtración(min)
ST	sólidos totales(mg/L)
ξ	eficiencia de la operación
ΔP_1	diferencia de presión de vacío mínima escala del vacuómetro (150 kgf/cm ²)
ΔP_2	diferencia de presión de vacío intermedia escala del vacuómetro (200 kgf/cm ²)
ΔP_3	<i>diferencia de presión de vacío máxima escala del vacuómetro (250 kgf/cm²)</i>
n_1	velocidad de rotación (2 000 rpm)
n_2	velocidad de rotación (3 000 rpm)
n_3	velocidad de rotación (4 000 rpm)
VAN	Valor Actual Neto (\$)
TIR	Tasa Interna de Retorno (%)
A	desembolso inicial (\$)
Q_i	flujos netos de efectivo (\$)
k	tasa de actualización, tasa de interés, tasa de descuento, o costo de capital
VR	valor residual (\$)
n	período de la inversión o tiempo de vida útil (a)
v	Viabilidad (%)
R	relación espora/cristal
p	Pureza (%)
R ²	coeficiente de determinación
P-value	valor de probabilidad de ajuste
D_{90}	función de deseabilidad de los procesos de separaciones mecánicas
F_i	Peso de cada variable