

Aplicación del algoritmo colonia de hormigas en un caso real discreto de planeación de la producción

Dr. Sergio M. Ramírez Campos¹, M.C. José G. Flores Cárdenas², M.C. Carolina I. Córdova Ramos³, Lic. Reynaldo Arias Vázquez⁴, Lic. Francisco D. Cárdenas Ledezma⁵, M.A. Ana L. Ramírez Jaramillo⁶

Resumen: Se presenta el diseño y aplicación del método colonia de hormigas (CH) en un caso real de planeación de la producción de guantes de látex, en el que se incrementó la utilización de la capacidad instalada de una línea de producción logrando la convergencia hacia un menor número de ciclos. Este caso fue considerado anteriormente con un algoritmo genético (AG) por Ramírez et al. (2009) cuyo alcance fue lograr soluciones factibles. Se consideran 28 pedidos que van desde 650 pares de guantes hasta 146,360 pares; cada producto requiere ciertas características ya que pueden ser para uso doméstico o para uso industrial; se dispone solo de tres tanques (contenedores) para las mezclas que requiere cada producto; cada lugar de la línea se ocupa por un plato (plataforma donde se colocan los moldes) y el número de pares de guantes por plato varía en términos de la medida (o talla) del guante que pueden ser hasta 6 diferentes tamaños; el número de platos para cada molde de cierta talla, está limitado. Otra limitante fuerte es la configuración de los tres tanques, ya que, dependiendo qué mezcla se coloca en cada contenedor, se podrán procesar uno o más productos diferentes en la línea en uno o más ciclos (un plato que realiza un ciclo, genera producto terminado). Los resultados obtenidos en este escenario muestran claramente la convergencia del método CH. Además, identificar una mejor solución implica determinar la secuenciación en que se van a procesar los productos (trabajos), de tal forma que ello permite conocer de antemano, las necesidades de cada mezcla en cuanto a volumen y momento, evitando así, el desperdicio por excedentes o la insatisfacción de los clientes por atraso en las entregas.

Palabras clave: Colonia de Hormigas, secuenciación de trabajos, utilización de la capacidad

Introducción

El método de optimización basado en colonia de hormigas (CH) sigue teniendo una amplia aplicación a pesar de haberse dado a conocer hace más de 30 años (Colorni et al., 1991). Nguyen y Jung (2022) diseñaron una modificación de este método en conjunto con una técnica de negociación automatizada para proponer un sistema descentralizado a fin de gestionar la congestión del tráfico y disminuir los tiempos de traslado, el consumo de combustible y las emisiones contaminantes. Li et al. (2021) desarrollaron un modelo híbrido de un sistema basado en el conocimiento y ACO para planear las rutas del turismo incrementando los ingresos y la satisfacción de los turistas. Agregan un algoritmo voraz para mejorar los resultados, logrando obtener el óptimo en las simulaciones realizadas.

En el campo del control aeronáutico autónomo, Selma et al. (2020) proponen un controlador inteligente y robusto basado en un sistema inferencial difuso, una red neuronal y un ACO mejorado para gobernar el comportamiento de los tres grados de libertad de un vehículo aéreo no tripulado de cuatro rotores, logrando mejores resultados que otros controladores. Calabrò et al. (2020) diseñaron un ACO modificado para resolver el problema de la logística de rutas competitivas de vehículos. Lo aplicaron a un caso de estudio en el sur de Italia logrando una reducción significativa en los recorridos, así como en el número de vehículos.

En cuanto a la planeación de la ruta de vehículos autónomos, Yue y Chen (2019) mejoran ACO agregando una estrategia de penalización a fin de aumentar el grado de la volatilización de la feromona en los caminos menos atractivos. Establecen un límite superior e inferior en la feromona para evitar una convergencia acelerada a un óptimo local, logrando resultados favorables.

¹El Dr. Sergio M. Ramírez Campos es jefe de proyectos de investigación en el departamento de Ingeniería Industrial del Tecnológico Nacional de México campus Saltillo, sergio.rc@saltillo.tecnm.mx (autor corresponsal)

²El maestro José G. Flores Cárdenas es docente en el departamento de Ingeniería Industrial del Tecnológico Nacional de México campus Saltillo, jose.fc@saltillo.tecnm.mx

³La maestra Carolina I. Córdova Ramos es docente en el departamento de Ingeniería Industrial del Tecnológico Nacional de México campus Saltillo, carolina.cr@saltillo.tecnm.mx

⁴El maestro Reynaldo Arias Vázquez es docente en el departamento de Ingeniería Industrial del Tecnológico Nacional de México campus Saltillo, arias.reynaldo17@gmail.com

⁵El maestro Francisco D. Cárdenas Ledezma es docente en el departamento de Ciencias Económico Administrativas del Tecnológico Nacional de México campus Saltillo, francisco.cl@saltillo.tecnm.mx

⁶La maestra Ana L. Ramírez Jaramillo es docente en el departamento de Ciencias Económico Administrativas del Tecnológico Nacional de México campus Saltillo, ana.ri@saltillo.tecnm.mx

Los casos mencionados tienen como común denominador la gran cantidad de posibles soluciones y diversas restricciones, al igual que el caso atendido en la presente investigación. La secuenciación y la cantidad de guantes representan las variables a estudiar, ya que se puede programar desde un par de guantes hasta 157,500 como se muestra más adelante. Por ello, el objetivo de esta investigación es determinar dichas variables a fin de reducir los ciclos de producción necesarios.

Metodología

El caso real se refiere al proceso de fabricar guantes de látex de diversas medidas que van de la talla 6 a la talla 11 y que pueden ser para uso doméstico o industrial. Utiliza el modelo por inmersión mediante un transportador. Primero se precalientan los moldes y se sumergen, en un primer contenedor, en el látex de manera lenta para luego retirarlos aún más lentamente. Los moldes calientes recubiertos de látex se sumergen, en un segundo contenedor, con un segundo compuesto, el coagulante, del que luego se eliminará el solvente que lo compone. Puede haber o no, una tercera inmersión para agregar otro componente, como por ejemplo un ingrediente químico que determina alguna característica del guante dependiendo si es de uso doméstico o industrial. Después de la inmersión, se envían al horno para el secado preliminar, se agrega la funda interior de fibra y el agua caliente se envían al horno para la vulcanización, el secado y el moldeado. Después de desmoldar los guantes, se inflan para su inspección, se moldean a baja temperatura, se secan a temperatura media, se lavan con agua, se deshidratan, se secan y luego se empaquetan y se envían al almacén de productos terminados.

Antes de mostrar los pasos del algoritmo Colonia de Hormigas (CH), es necesario considerar la siguiente nomenclatura:

1. Producto a ser procesado (**p**). Se refiere a un cierto tipo de guante sin importar la medida en relación a una demanda a satisfacer.
2. Demanda de un producto (**dp**). Es la cantidad total que se decide procesar de un cierto producto **pp**.
3. Producto programado para ser procesado (**pp**). Se refiere a una cierta cantidad de cierto tipo de guante y talla (medida del guante). Dicha cantidad puede ser menor o igual a **dp**.
4. Número de **pp**'s a procesar (**np**). En el anexo 1 se observa que son 28.
5. Número de platos (**pt**) y ciclos (**ct**) requeridos para procesar la producción de cada **pp**.
6. Configuración de mezclas (**cm**). Conjunto de mezclas de químicos requerido para procesar uno o más productos **p**.

Cabe aclarar que una configuración de mezclas (**cm**) se refiere a un cierto número de tanques, con una cierta mezcla contenida en cada uno de ellos. A partir de una demanda **dp** se identifica una configuración de tanques (entra varias posibles) para procesar dicha demanda.

Pasos del algoritmo Colonia de Hormigas (CH) diseñado

En el desarrollo de CH, se utiliza el concepto de cromosoma y de gen que se utilizaron en Ramírez et al. (2009), ya que ello facilita el diseño de CH, lo cual permitiría identificar también el diseño como un algoritmo híbrido. Su origen es debido a que uno o más productos utilizan una cierta configuración de tanques de inmersión, por lo que un gen será el conjunto de productos que tienen una misma configuración de tanques. Por lo tanto, un cromosoma estará compuesto por los genes necesarios para cubrir toda la demanda de un periodo. De aquí que la longitud de un cromosoma sea variable.

El objetivo es minimizar el número total de ciclos (**ntc**). Enseguida se describen los pasos del método aplicado.

Paso A: Fijar los parámetros iniciales. En la tabla 1 se muestran dichos parámetros.

Número de hormigas	Constante de feromona	Constante de evaporación	Constante de ponderación
m	Q	ρ	α

Tabla 1. Parámetros de CH

Paso B: Determinar la cantidad total de platos y ciclos necesarios para cada **pp_j**. Dado que la demanda (**dp**) no es un múltiplo del número de **pp**'s por plato, se realiza el siguiente procedimiento.

La cantidad del total de platos inicial (**pti**) se calcula de acuerdo a la ecuación 1.

$$pti = \frac{dp}{5mb}(1 + fp) \quad (1)$$

Donde,

mb = Número de moldes por cada barra
 fp = Factor porcentual por pérdidas en producción

En cada plato se insertan 5 barras para moldes mano izquierda y 5 moldes para moldes mano derecha. Debido al tamaño del guante, mb puede variar. Se considera un porcentaje adicional (fp) a lo programado para compensar los productos rechazados por diversas causas.

La cantidad total de ciclos inicial necesarios (sin redondear) se calcula como se indica en la ecuación 2.

$$cti = pti/ip \quad (2)$$

Donde,

ip = Cantidad total de platos disponibles en inventario

Al redondear cti al entero inferior, $[cti]$, o al entero superior, $\lceil cti \rceil$, los platos requeridos pueden ser pr_1 o pr_2 , como se indica en las ecuaciones 3 y 4.

$$pr_1 = pti/\lceil cti \rceil \quad (3)$$

$$pr_2 = pti/[cti] \quad (4)$$

Al redondear pr_1 o pr_2 al entero más próximo y comparar con ip , se puede decidir al respecto como se indica en la tabla 1.

Condición	Cantidad total de platos a procesar (pt)	Cantidad total de ciclos a procesar (ct)
$[pr_1] \leq ip$	$[pr_1]$	$[cti]$
$[pr_1] > ip$	$[pr_2]$	$[cti]$

Tabla 1. Cantidad a producir en platos y ciclos.

Este procedimiento arrojó un promedio de 0.97% de variación absoluta respecto a la producción total deseada en términos de pares de guantes.

Paso C: Si es la iteración 1, generar una solución al azar. Para ello, formar al azar una configuración de mezclas cm_i e identificar los productos que pueden ser procesados con dicha cm_i . Este paso se repite las veces que sea necesario hasta que toda la demanda (todos los productos) estén incluidos en alguna cm_i . Cada cm_i corresponde a un gen. En otras palabras, para cada cm_i se identifica un subconjunto U_j de productos pp_j . El número de cm que fue necesario, es el total de genes (tg) de la solución en turno. A partir de las cm y los conjuntos U ya determinados, llevar a cabo la programación detallada para determinar el número total de ntc . El procedimiento es como sigue.

1. Se actualiza la matriz de lugares disponibles, mld . A través de esta matriz, se lleva el control de los lugares libres y ocupados. En la figura 1 se muestran los lugares disponibles (columnas) por ciclo (renglones). Al inicio, todos están libres, lo cual se indica con ceros. En esta matriz se marcan ocupados los lugares que se indican en la tabla 2 columnas 8 y 9 (lugares que están ocupando) y columnas 11 y 12 (ciclos que se están ocupando). Además, cuando se cambia de un gen al siguiente, lo cual se observa en la tabla 2 columna 13 renglones 19 y 20, todos los lugares no ocupados del evento 1 al evento 19 y hasta el ciclo mayor (indicado en la columna 19) del evento 19, se marcan ocupados para que no se utilicen. Esto es, para evitar que los productos con la cm actual no se mezclen con los productos que requieren la nueva cm .

Ciclo	Lugares				
	1	2	...	30	31
1	0	0	...	0	0
2	0	0	...	0	0
⋮			...		
120	0	0	...	0	0
⋮			...		

Fig. 1. Matriz de lugares por ciclo (**mld**).

- Actualizar la matriz de eventos, **me**. A través de esta matriz se van registrando los eventos en el orden en que se suceden. En la tabla 2 se muestran, parcialmente, los eventos 1 al 21 de la mejor solución encontrada por el algoritmo.

Evento	Demanda				Programación								Variación		Moldes por barra	Platos en inventario	Clave del molde	Ciclo mayor
	Tipo	Talla	Pedido	Solicitado	Producir	Platos			Ciclos			No. gen	pares	%				
	1	2	3	4		5	Total	de	a	Total	de							
1	490	9	4248	4587	4680	2	1	2	3	1	3	1	-93	-1.99	13	34	12	3
2	490	9				12	3	14	3	1	3	1						3
3	490	9				10	15	24	3	1	3	1						3
4	490	11	5328	5754	5670	3	25	27	18	1	18	1	84	1.48	9	7	12	18
5	490	11				2	28	29	18	1	18	1						18
6	490	11				1	30	30	18	1	18	1						18
7	490	11				1	31	31	18	1	18	1						18
8	490	10	2160	2332	2280	14	1	14	2	4	5	1	52	2.28	12	20	12	18
9	490	10				1	15	15	2	4	5	1						18
10	490	10				2	16	17	2	4	5	1						18
11	490	10				1	18	18	2	4	5	1						18
12	490	10				1	19	19	2	4	5	1						18
13	497	7	1000	1079	1050	5	20	24	1	19	19	2	29	2.76	14	18	12	19
14	497	7				8	1	8	1	19	19	2						19
15	497	7				1	9	9	1	19	19	2						19

Tabla 2. Programación detallada de una solución (**me**).

En el renglón 1, que corresponde al evento 1, se indica, en las columnas 2 a 6, lo que, previamente, determinó el algoritmo, es decir, qué **pp** procesar (columnas 2 y 3), cuántos platos (columna 7) y cuántos ciclos (columna 10). Esto está sujeto a los platos en inventario (columna 17) y a los lugares disponibles en el transportador (lo cual se determina a partir de la **mld**). También, se observa que de los 34 platos disponibles (renglón 1, columna 17) se programaron 24 en tres eventos (renglones 1, 2 y 3 y columna 7). En las columnas 8 y 9 se indican los lugares ocupados, en el evento 1 (renglón 1) se utilizan los lugares 1 al 2. En las columnas 11 y 12 se indican los ciclos utilizados, es decir, los 2 platos van a estar 3 ciclos (columna 10) del ciclo 1 al 3.

Para abundar en la explicación, en la tabla 3 se muestra parte de la información de los eventos 1 al 4 de la tabla 2.

Se observa en la tabla 3 que, en tanto no se saturan los 31 lugares del ciclo 1, se pueden seguir asignando productos del ciclo 1 en adelante. En la tabla 2 se observa que a partir del evento 8 ya se saturaron los lugares, por lo cual los 14 platos de este evento se programan en los lugares 1 a 14, del ciclo 4 en adelante, ya que dichos lugares terminan (o se desocupan) en el ciclo 3.

Evento	Producto			Platos			Lugares			Ciclos		
	Tipo	Talla	Disponibles	utilizados	Inventario	Disponibles	Utilizados		Utilizados	del	al	
	1	2					Total	del				al
1	490	9	34	2	32	31	2	1	2	3	1	3
2			32	12	20	29	12	3	14	3	1	3
3			3	10	17	15	10	15	24	3	1	3
4	490	11	7	3	4	5	3	25	27	18	1	18

Tabla 3. Desglose de algunos eventos de la tabla 2.

Una vez que se terminaron de procesar todos los productos, se calcula la desviación estándar (**d_e**) de cada **pp**, en relación a la columna 12 de la **me**. Esto permite reducir el impacto de los cambios de gen. La columna 12 de la **me** se refiere al número de ciclo en que se termina cada evento. Para ilustrarlo, en las ecuaciones 5 y 6 se muestran los cálculos de la **d_e** de los eventos 1, 2 y 3 de la tabla 2 que corresponden al producto 490 talla 9 y cuyos valores de la columna 12 son: 3, 3 y 3.

$$\bar{x} = \frac{3+3+3}{3} = 3 \quad (5)$$

$$d_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 (x_i - 3)^2}{3-1}} = 0.00 \quad (6)$$

La d_e de cada pp se utiliza para fijar el nivel de atractividad asociado, de acuerdo a la ecuación 7.

$$\eta = \frac{1}{d_e} \quad (7)$$

Si d_e es cero entonces $\eta = 1$.

Para efectos de la feromona, se calculan los ciclos-plato vacíos (cpv) atribuidos a cada pp y que se pueden calcular al cambiar de un gen a otro la solución en turno. En la tabla 2 se puede observar el cambio de gen en los eventos 12 y 13 y columna 13. En la columna 19 del evento 19 el ciclo mayor incurrido en el gen 1 (columna 13) es 18 (c_{may}). Así, los cpv se del producto 490 talla 9, se obtienen restando al c_{may} el ciclo (columna 12) en que se terminan de procesar los platos de los eventos 1, 2 y 3 y multiplicando por los platos procesados (columna 7). En la tabla 4 se resume este ejemplo.

	Evento			Total
	1	2	3	
(c_{may} -columna 12)	(18-3)	(18-3)	(18-3)	
Columna 7	2	12	10	
cpv	30	180	150	360

Tabla 4. Ejemplo del cálculo de los cpv .

La suma del renglón 4 de la tabla 4 da 360. La feromona asociada a cada producto está definida de acuerdo a la ecuación 8.

$$\tau = \left(\frac{1}{cpv}\right)Q \quad (8)$$

Si $cpv = 0$ entonces $\tau = Q$.

Con lo anterior se calculan las probabilidades (p_i) para cada pp de acuerdo a la ecuación 9.

$$p_i = \frac{\alpha\tau_i + (1-\alpha)\eta_i}{\sum_{k=0}^n [\alpha\tau_k + (1-\alpha)\eta_k]} \quad (9)$$

En la iteración 1 de cada corrida, todas las m hormigas obtienen una solución al azar. A partir de la iteración 2, cada hormiga utiliza las probabilidades derivadas de la feromona y de la atractividad.

Paso D: Si es una iteración mayor que 1, identificar los pp 's de cada gen en la solución anterior, de manera que se forman q conjuntos, donde q es el número total de genes de la solución anterior. Cada conjunto S , originalmente presenta un ordenamiento de los pp 's, así como los genes. En este paso, se reordenan al azar ambos aspectos.

Para reordenar los pp 's de cada conjunto S , se utiliza el método de la ruleta que consiste en lo siguiente. Primero se calcula la suma (P) de las probabilidades (p_k) de cada pp del conjunto S (donde c_s es la cardinalidad del conjunto), como se indica en la ecuación 10.

$$P = \sum_{k=1}^{c_s} p_k \quad (10)$$

Enseguida se calcula la probabilidad relativa (f_j) de cada pp de acuerdo a la ecuación 11.

$$f_j = \frac{p_k}{P} \quad (11)$$

Se acumulan las probabilidades relativas (f_j) obteniendo los intervalos abiertos para cada pp_j como se muestra en la tabla 2.

pp_1	pp_2	...	pp_k
$F_1 = f_1$	$F_2 = F_1 + f_2$...	$F_k = F_{k-1} + f_k$
$(0 - F_1)$	$(F_1 - F_2)$...	$(F_{k-1} - F_k)$

Tabla 5. Intervalos para d_j

Se genera un número uniforme aleatorio continuo, r_i como se muestra en la ecuación 12.

$$r_i \sim U(0,1) \quad (12)$$

Se identifica el intervalo j que contiene a r_i y se selecciona pp_j terminando así, el método de la ruleta. Con este nuevo ordenamiento, se consideran los productos para una nueva solución.

Se continúa con los pasos 1 y 2 del paso C hasta completar las iteraciones deseadas.

Paso E: Llevar a cabo las corridas deseadas. Cada corrida realiza n iteraciones.

Paso F: Una vez que terminan las corridas, identificar y mostrar la mejor corrida.

Se desarrolló la programación en Microsoft Visual Basic for Applications VBA en Excel 2016 y las corridas se realizaron en un procesador Intel Core i7-4790 de 64 bits, 3.60 Ghz y 8 GB en RAM. El tiempo promedio por corrida fue de 0.7441 minutos. A continuación, se desarrollan los resultados y el análisis.

Resultados y Análisis

La información de entrada al modelo desarrollado se muestra a continuación. En las tablas 6 y 7 se incluye la demanda considerada en la investigación y que corresponde a un mes. Esta demanda se satisface completamente ya que se considera una restricción dura.

1	3	4	5
No.	cantidad	referencia	Talla
1	6696	485	6
2	4536	485	7
3	5760	485	8
4	114696	485	9
5	48960	485	10
6	15768	485	11
7	5900	487	6
8	3744	487	11
9	4248	490	9
10	2160	490	10
11	5328	490	11
12	1350	491	6
13	650	491	7
14	7450	491	8

Tabla 6. Demanda original de los productos

1	3	4	5
No.	cantidad	referencia	talla
15	20150	491	9
16	55092	492	7
17	73964	492	8
18	135884	492	9
19	146360	492	10
20	4704	492	11
21	12300	495	6
22	4600	495	7
23	4900	495	8
24	1100	495	10
25	1000	497	7
26	4900	497	8
27	3700	497	9
28	3900	497	10

Tabla 7. Demanda original de los productos (continuación)

En la tabla 8, se encuentra la información de los moldes requeridos por producto y los ingredientes posibles de las mezclas. Se puede ver que se dispone de diversas alternativas en cuanto a los ingredientes de las capas.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
No.	referencia	código molde	coagulante	capa1a	capa1b	capa1c	capa1d	capa2a	capa2b	capa2c	capa2d
1	485	12	730001	730093	0	0	0	730094	0	0	0
2	487	10	730001	730009	730008	730023	730010	0	0	0	0
3	490	12	730001	730009	730008	730023	730010	730009	730008	730023	730010
4	491	12	730001	730009	730023	730010	0	730013	0	0	0
5	492	27	730001	730009	730023	730010	0	730013	0	0	0
6	495	12	730001	730011	730016	730018	0	730018	0	0	0
7	497	12	730001	730011	730016	730018	0	730013	0	0	0

Tabla 8. Moldes requeridos e ingredientes posibles de los productos.

En las tablas 9 y 10, se encuentran los datos de los moldes por barra e inventario de platos. En cada barra se colocan los moldes y en cada plato se insertan 5 barras.

1	2	3	4	5
No.	código molde	talla	moldes/barra	inv. platos
1	10	6	14	9
2	10	7	14	5
3	10	8	14	12
4	10	9	13	21
5	10	10	12	26
6	10	11	9	7
7	11	6	14	2
8	11	7	14	3
9	11	8	14	6
10	11	9	13	8
11	11	10	12	5
12	11	11	9	3
13	12	6	14	9
14	12	7	14	18

Tabla 9. Moldes por barra e inventario de platos.

1	2	3	4	5
No.	código molde	talla	moldes/barra	inv. platos
15	12	8	14	20
16	12	9	13	34
17	12	10	12	20
18	12	11	9	7
19	27	7	14	5
20	27	8	14	12
21	27	9	13	20
22	27	10	12	25
23	27	11	9	10
24	25	7	14	3
25	25	8	14	7
26	25	9	13	23
27	25	10	12	16
28	25	11	9	5

Tabla 10. Moldes por barra e inventario de platos.

En las tablas 11 y 12, se muestran las configuraciones posibles de las mezclas. Por ejemplo, el producto 485 solo tiene una configuración posible. Sin embargo, el producto 487 tiene 16 posibles configuraciones.

1	2	3	4	5	6	7
No.	referencia	código molde	No.	Coagulante	capa1	capa 2
1	485	12	1	730001	730093	730094
2	487	10	1	730001	730009	
3	487	10	2	730001	730008	
4	487	10	3	730001	730023	
5	487	10	4	730001	730010	
6	490	12	1	730001	730009	730009
7	490	12	2	730001	730009	730008
8	490	12	3	730001	730009	730023
9	490	12	4	730001	730009	730010
10	490	12	5	730001	730008	730009
11	490	12	6	730001	730008	730008
12	490	12	7	730001	730008	730023
13	490	12	8	730001	730008	730010
14	490	12	9	730001	730023	730009
15	490	12	10	730001	730023	730008
16	490	12	11	730001	730023	730023
17	490	12	12	730001	730023	730010

Tabla 11. Configuraciones posibles de las mezclas.

1	2	3	4	5	6	7
No.	referencia	código molde	No.	Coagulante	capa1	capa 2
18	490	12	13	730001	730010	730009
19	490	12	14	730001	730010	730008
20	490	12	15	730001	730010	730023
21	490	12	16	730001	730010	730010
22	491	12	1	730001	730009	730013
23	491	12	2	730001	730023	730013
24	491	12	3	730001	730010	730013
25	492	27	1	730001	730009	730013
26	492	27	2	730001	730023	730013
27	492	27	3	730001	730010	730013
28	495	12	1	730001	730011	730018
29	495	12	2	730001	730016	730018
30	495	12	3	730001	730018	730018
31	497	12	1	730001	730011	730013
32	497	12	2	730001	730016	730013
33	497	12	3	730001	730018	730013

Tabla 12. Configuraciones posibles de las mezclas.

Después de algunas pruebas preliminares, se escogieron los parámetros mostrados en la tabla 13.

m = 4	Q = 10	ρ = 0.8	α = 0.8	Iteraciones = 90
--------------	---------------	----------------	----------------	-------------------------

Tabla 13. Parámetros para las corridas

Se llevaron a cabo 50 corridas y los resultados promedio se muestran en la figura 2, en donde se puede apreciar que el algoritmo es consistente y tiende a estabilizarse. La mejor corrida se muestra parcialmente en la tabla 2 y en el anexo 2 se incluye completa.

Todas las soluciones son factibles, es decir, se respetan las restricciones duras: no se excede el inventario de platos de cada talla, no se exceden los 31 lugares del transportador, no hay empalmes en los ciclos, se satisface la cantidad programada a procesar de cada producto y se respeta la configuración de mezclas de cada producto incluido en cada gen.

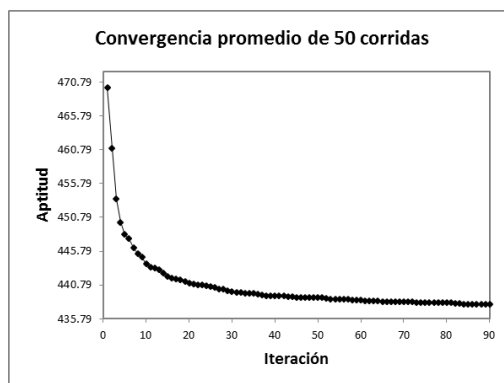


Figura 2. Resultados promedio

Las configuraciones de mezclas de la mejor solución se muestran en la tabla 14.

No. de gen	coagu_lante	capa 1	capa 2	cpv
1	730001	730009	730009	607
2	730001	730011	730013	249
3	730001	730009		18
4	730001	730016	730018	912
5	730001	730009	730013	12246
6	730001	730093	730094	3368

Tabla 14. Configuración de mezclas de cada gen.

En la solución completa que se incluye en las tablas 15 – 17, se puede leer, en el último evento (tabla 17), que el número total de ciclos es de 435. Las soluciones al azar que corresponden a la iteración 1 de cada corrida requieren cerca de 470 ciclos. Esto implica una mejora de 7.5% en cuanto al uso de las instalaciones. Por otro lado, al conocer de antemano, las necesidades de cada mezcla en cuanto a volumen y momento, se evita el desperdicio por excedentes o la insatisfacción de los clientes por atraso en las entregas. Consultando la tabla 7 para el gen 1, se sabe la configuración de mezclas necesaria y en la tabla 2 se observa que el gen 1 abarca del evento 1 al evento 8. Lo mismo puede leerse respecto a los demás genes. Esto permite planear los volúmenes de cada ingrediente y el momento en que se van a requerir.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Demanda					Programación								Variación		Moldes	Platos	Clave	
Evento	Tipo	Talla	Pedido	Solicitado	Producir	Platos			Ciclos			No. gen	pares	%	por barra	en inventario	del molde	ciclo mayor
						Total	de	a	Total	de	a							
1	490	9	4248	4587	4680	2	1	2	3	1	3	1	-93	-1.99	13	34	12	3
2	490	9				12	3	14	3	1	3	1						3
3	490	9				10	15	24	3	1	3	1						3
4	490	11	5328	5754	5670	3	25	27	18	1	18	1	84	1.48	9	7	12	18
5	490	11				2	28	29	18	1	18	1						18
6	490	11				1	30	30	18	1	18	1						18
7	490	11				1	31	31	18	1	18	1						18
8	490	10	2160	2332	2280	14	1	14	2	4	5	1	52	2.28	12	20	12	18
9	490	10				1	15	15	2	4	5	1						18
10	490	10				2	16	17	2	4	5	1						18
11	490	10				1	18	18	2	4	5	1						18
12	490	10				1	19	19	2	4	5	1						18
13	497	7	1000	1079	1050	5	20	24	1	19	19	2	29	2.76	14	18	12	19
14	497	7				8	1	8	1	19	19	2						19
15	497	7				1	9	9	1	19	19	2						19
16	497	7				1	10	10	1	19	19	2						19
17	497	10	3900	4211	4320	9	11	19	4	19	22	2	-109	-2.52	12	20	12	22
18	497	10				3	25	27	4	19	22	2						22
19	497	10				2	28	29	4	19	22	2						22
20	497	10				2	30	31	4	19	22	2						22
21	497	10				1	1	1	4	20	23	2						23
22	497	10				1	2	2	4	20	23	2						23
23	497	8	4900	5291	5320	2	3	4	4	20	23	2	-29	-0.55	14	20	12	23
24	497	8				2	5	6	4	20	23	2						23
25	497	8				1	7	7	4	20	23	2						23
26	497	8				1	8	8	4	20	23	2						23
27	497	8				2	9	10	4	20	23	2						23
28	497	8				5	20	24	4	20	23	2						23
29	497	8				6	11	16	4	23	26	2						26
30	497	9	3700	3995	4030	2	17	18	2	23	24	2	-35	-0.87	13	34	12	26
31	497	9				1	19	19	2	23	24	2						26
32	497	9				6	25	30	2	23	24	2						26
33	497	9				1	31	31	2	23	24	2						26
34	497	9				2	1	2	2	24	25	2						26
35	497	9				2	3	4	2	24	25	2						26
36	497	9				1	5	5	2	24	25	2						26
37	497	9				3	6	8	2	24	25	2						26
38	497	9				2	9	10	2	24	25	2						26
39	497	9				4	20	23	2	24	25	2						26
40	497	9				1	24	24	2	24	25	2						26
41	497	9				1	17	17	2	25	26	2						26
42	497	9				1	18	18	2	25	26	2						26
43	497	9				1	19	19	2	25	26	2						26
44	497	9				1	25	25	2	25	26	2						26
45	497	9				1	26	26	2	25	26	2						26
46	497	9				1	27	27	2	25	26	2						26
47	487	11	3744	4043	3780	3	28	30	12	27	38	3	263	6.96	9	7	10	38
48	487	11				2	1	2	12	27	38	3						38
49	487	11				2	3	4	12	27	38	3						38
50	487	6	5900	6371	6300	1	5	5	10	27	36	3	71	1.13	14	9	10	38
51	487	6				1	6	6	10	27	36	3						38
52	487	6				4	7	10	10	27	36	3						38
53	487	6				3	11	13	10	27	36	3						38
54	495	6	12300	13283	13230	9	14	22	21	39	59	4	53	0.40	14	9	12	59
55	495	7	4600	4967	5040	7	1	7	4	39	42	4	-73	-1.45	14	18	12	59
56	495	7				6	8	13	4	39	42	4						59
57	495	7				3	23	25	4	39	42	4						59
58	495	7				2	26	27	4	39	42	4						59
59	495	10	1100	1187	1200	2	28	29	1	39	39	4	-13	-1.08	12	20	12	59
60	495	10				2	30	31	1	39	39	4						59
61	495	10				2	28	29	1	40	40	4						59
62	495	10				1	30	30	1	40	40	4						59
63	495	10				1	31	31	1	40	40	4						59
64	495	10				3	28	30	1	41	41	4						59
65	495	10				1	31	31	1	41	41	4						59
66	495	10				4	28	31	1	42	42	4						59
67	495	10				3	1	3	1	43	43	4						59
68	495	10				1	4	4	1	43	43	4						59
69	495	8	4900	5291	5320	8	5	12	4	43	46	4	-29	-0.55	14	20	12	59
70	495	8				1	13	13	4	43	46	4						59

Tabla 15. Solución completa (continúa)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Demanda					Programación								Variación		Molde s por barra	Platos en in- ventari o	Clave del mold e	ciclo mayor
Evento	Tipo	Talla	Pedido	Solicitud	Produci r	Platos			Ciclos			No. ge n	Variación					
						Tota l	de	a	Tota l	de	a		pares	%				
71	495	8				9	23	31	4	43	46	4						59
72	495	8				1	1	1	4	44	47	4						59
73	492	7	55092	59499	59150	3	2	4	169	60	228	5	349	0.59	14	5	27	228
74	492	7				1	1	1	169	60	228	5						228
75	492	7				1	5	5	169	60	228	5						228
76	492	11	4704	5080	4950	2	6	7	11	60	70	5	130	2.63	9	10	27	228
77	492	11				5	8	12	11	60	70	5						228
78	492	11				2	13	14	11	60	70	5						228
79	492	11				1	15	15	11	60	70	5						228
80	491	6	1350	1457	1470	1	16	16	3	60	62	5	-13	-0.88	14	9	12	228
81	491	6				5	17	21	3	60	62	5						228
82	491	6				1	22	22	3	60	62	5						228
83	492	10	146360	158068	157500	3	23	25	105	60	164	5	568	0.36	12	25	27	228
84	492	10				3	26	28	105	60	164	5						228
85	492	10				1	29	29	105	60	164	5						228
86	492	10				2	30	31	105	60	164	5						228
87	492	10				5	16	20	105	63	167	5						228
88	492	10				2	21	22	105	63	167	5						228
89	492	10				7	6	12	105	71	175	5						228
90	492	10				2	13	14	105	71	175	5						228
91	492	9	135884	146754	145600	1	15	15	112	71	182	5	1154	0.79	13	20	27	228
92	492	9				6	23	28	112	165	276	5						276
93	492	9				1	29	29	112	165	276	5						276
94	492	9				1	30	30	112	165	276	5						276
95	492	9				1	31	31	112	165	276	5						276
96	492	9				6	16	21	112	168	279	5						279
97	492	9				1	22	22	112	168	279	5						279
98	492	9				3	6	8	112	176	287	5						287
99	492	8	73964	79881	79800	1	9	9	95	176	270	5	81	0.10	14	12	27	287
100	492	8				5	10	14	95	176	270	5						287
101	492	8				1	15	15	95	183	277	5						287
102	492	8				5	1	5	95	229	323	5						323
103	491	7	650	701	700	5	9	13	1	271	271	5	1	0.14	14	18	12	323
104	491	7				1	14	14	1	271	271	5						323
105	491	7				2	9	10	1	272	272	5						323
106	491	7				1	11	11	1	272	272	5						323
107	491	7				1	12	12	1	272	272	5						323
108	491	9	20150	21761	21450	1	13	13	10	272	281	5	311	1.45	13	34	12	323
109	491	9				1	14	14	10	272	281	5						323
110	491	9				2	9	10	10	273	282	5						323
111	491	9				2	11	12	10	273	282	5						323
112	491	9				5	23	27	10	277	286	5						323
113	491	9				3	28	30	10	277	286	5						323
114	491	9				1	31	31	10	277	286	5						323
115	491	9				1	15	15	10	278	287	5						323
116	491	9				7	16	22	10	280	289	5						323
117	491	9				1	13	13	10	282	291	5						323
118	491	9				1	14	14	10	282	291	5						323
119	491	9				4	9	12	10	283	292	5						323
120	491	9				2	23	24	10	287	296	5						323
121	491	9				2	25	26	10	287	296	5						323
122	491	8	7450	8045	7980	2	27	28	6	287	292	5	65	0.81	14	20	12	323
123	491	8				3	29	31	6	287	292	5						323
124	491	8				1	6	6	6	288	293	5						323
125	491	8				2	7	8	6	288	293	5						323
126	491	8				1	15	15	6	288	293	5						323
127	491	8				6	16	21	6	290	295	5						323
128	491	8				1	22	22	6	290	295	5						323
129	491	8				1	13	13	6	292	297	5						323
130	491	8				1	14	14	6	292	297	5						323
131	491	8				1	9	9	6	293	298	5						323
132	485	11	15768	17029	17010	3	10	12	54	324	377	6	19	0.11	9	7	12	377
133	485	11				2	1	2	54	324	377	6						377
134	485	11				1	3	3	54	324	377	6						377
135	485	11				1	4	4	54	324	377	6						377
136	485	9	114696	123871	123760	4	5	8	56	324	379	6	111	8.97	13	34	12	379
137	485	9				1	9	9	56	324	379	6						379
138	485	9				4	13	16	56	324	379	6						379
139	485	9				7	17	23	56	324	379	6						379
140	485	9				5	24	28	56	324	379	6						379

Tabla 16. Solución completa (continúa)

Demanda					Programación								Variación		Molde s por barra	Platos en in- ventari o	Clave del mold e	ciclo mayor
Evento	Tipo	Talla	Pedido	Solicitud	Producir	Platos			Ciclos			No. gen	pares	%				
						Total	de	a	Total	de	a							
141	485	9				1	29	29	56	324	379	6					379	
142	485	9				2	30	31	56	324	379	6					379	
143	485	9				2	1	2	56	378	433	6					433	
144	485	9				2	3	4	56	378	433	6					433	
145	485	9				2	10	11	56	378	433	6					433	
146	485	9				1	12	12	56	378	433	6					433	
147	485	9				3	5	7	56	380	435	6					435	
148	485	6	6696	7231	6930	1	8	8	11	380	390	6	301	4.34	14	9	12	435
149	485	6				1	9	9	11	380	390	6					435	
150	485	6				5	13	17	11	380	390	6					435	
151	485	6				2	18	19	11	380	390	6					435	
152	485	8	5760	6220	6300	8	20	27	5	380	384	6	-80	-1.27	14	20	12	435
153	485	8				3	28	30	5	380	384	6					435	
154	485	8				1	31	31	5	380	384	6					435	
155	485	8				5	20	24	5	385	389	6					435	
156	485	8				1	25	25	5	385	389	6					435	
157	485	10	48960	52876	52800	5	26	30	44	385	428	6	76	0.14	12	20	12	435
158	485	10				1	31	31	44	385	428	6					435	
159	485	10				5	20	24	44	390	433	6					435	
160	485	10				1	25	25	44	390	433	6					435	
161	485	10				1	8	8	44	391	434	6					435	
162	485	10				1	9	9	44	391	434	6					435	
163	485	10				1	13	13	44	391	434	6					435	
164	485	10				5	14	18	44	391	434	6					435	
165	485	7	4536	4898	4760	1	19	19	4	391	394	6	138	2.90	14	18	12	435
166	485	7				1	19	19	4	395	398	6					435	
167	485	7				1	19	19	4	399	402	6					435	
168	485	7				1	19	19	4	403	406	6					435	
169	485	7				1	19	19	4	407	410	6					435	
170	485	7				1	19	19	4	411	414	6					435	
171	485	7				1	19	19	4	415	418	6					435	
172	485	7				1	19	19	4	419	422	6					435	
173	485	7				1	19	19	4	423	426	6					435	
174	485	7				1	19	19	4	427	430	6					435	
175	485	7				6	26	31	4	429	432	6					435	
176	485	7				1	19	19	4	431	434	6					435	

Tabla 17. Solución completa (termina)

Conclusiones

En esta investigación, se logró incrementar la productividad al reducir el número de ciclos de producción necesarios. La conveniencia del método en cuestión, utiliza una simulación a la medida que permite replicar las condiciones relevantes del escenario real y por medio de CH llevar a cabo una búsqueda apropiada en un universo grande de soluciones. En la práctica, esta metodología híbrida, facilita abordar problemas complejos que, inclusive, logra un análisis completo sin la necesidad de llevar a cabo cambios en la realidad, lo cual normalmente es costoso. Asimismo, el análisis previo de posibles cambios en el escenario real, también es posible con esta técnica.

Las dificultades (o requerimientos) que se presentan en una investigación que utiliza esta metodología, se pueden resumir en dos aspectos. El primero, es la habilidad de modelar apropiadamente el caso real a fin de realizar la simulación inherente. El segundo aspecto, es encontrar el diseño correcto de CH a las particularidades del caso. Ambos aspectos se pueden mejorar utilizando la metodología con la mayor frecuencia posible.

Finalmente, como trabajo futuro, se piensa aplicar el algoritmo de recocido simulado a este mismo escenario para comparar el desempeño de ambos métodos.

Referencias

- Calabrò G., Torrisi V., Inturri G. & Ignaccolo M. (2020). Improving inbound logistic planning for large-scale real-world routing problems: a novel ant-colony simulation-based optimization. <https://doi.org/10.1186/s12544-020-00409-7>.
- Colormi A. & Dorigo M., Maniezzo V. (1991). Distributed optimization by ant colonies. In: *Proceedings of the first European conference on artificial life*, MIT Press/Bradford Book, Paris Elsevier Publishing, 134–142.
- Li S., Luo T., Wang L., Xing L. & Ren T. Tourism route optimization based on improved knowledge ant colony algorithm. *Complex & Intelligent Systems*, <https://doi.org/10.1007/s40747-021-00635-z>.
- Nguyen, T., Jung, J. J. (2022). ACO-based traffic routing method with automated negotiation for connected vehicles. *Complex & Intelligent Systems*, <https://doi.org/10.1007/s40747-022-00833-3>.

- Ramírez C. S. M., Jiménez D. X., López A. y M. y Contreras I. K. L. Aplicación de un Algoritmo Genético Simple con Reparación en un Caso Real de Planeación de Producción Discreta: Fase I. *Revista de la Ingeniería Industrial*, Vol. 3 no. 1 AcademiaJournals.com.
- Selma B., Chouraqui S. & Abouaïssa H. (2020). Optimization of ANFIS controllers using improved ant colony to control an UAV trajectory tracking task. *SN Applied Sciences*, <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2236-z>.
- Yue L. & Chen H. (2019). Unmanned vehicle path planning using a novel ant colony algorithm. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*. <https://doi.org/10.1186/s13638-019-1474-5>.